

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN VIVIENDAS DE INTERÉS MEDIO
USO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN ARQUITECTURA PRESENTA:

ANA LILIA ORTEGA MOLINA

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

CAMPO DE CONOCIMIENTO TECNOLOGÍA

Agosto de 2009





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.

JURADO

M. EN ARQ. FRANCISCO REYNA GÓMEZ

DR. JOSÉ DIEGO MORALES RAMÍREZ

M. EN ARQ. JORGE RANGEL DÁVALOS

DRA. DOLORES ANA FLORES SANDOVAL

M. EN ARQ. ERNESTO OCAMPO RUIZ

Agradecimientos

A mi mamá, por que siempre he contado con ella, por su paciencia y apoyo en todos los proyectos que he realizado y por que sin ella no hubiera podido salir adelante.

A mis hermanas, Alejandra y Elizabeth que han estado siempre conmigo y han creído en mí, al igual que toda mi familia.

A mis amigos, en especial a Adriana, Perla y Marina, por su amistad, apoyo y confianza.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, donde me formé como profesional y donde encontré la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

A mis maestros del posgrado que fueron de gran ayuda en la realización de este trabajo, especialmente al Arq. Héctor Ferreiro por su dirección en la elaboración de ésta tesis.

A todos muchas gracias.

INDICE

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

2. ANTECEDENTES

- 2.1. GENERACIÓN DE ENERGÍA
- 2.2. EMISIONES DE CO₂ EN MÉXICO
- 2.3. RESERVAS DE HIDROCARBUROS EN MÉXICO
- 2.4. ENERGÍAS ALTERNAS
- 2.5. ENERGÍA SOLAR

3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

- 3.1. CONCEPTOS ELÉCTRICOS
- 3.2. HISTORIA Y FUNDAMENTOS DE LAS CELDAS SOLARES
- 3.3. MATERIALES
- 3.4. INTEGRACIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO
 - 3.4.1. SISTEMAS AUTÓNOMOS
 - 3.4.2. SISTEMAS CONECTADOS A RED
- 3.5. EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA
- 3.6. INTEGRACIÓN ARQUITECTÓNICA

4. ANÁLISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO

- 4.1. MARCO LEGAL
- 4.2. ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN MÉXICO Y EL MUNDO
- 4.3. ANÁLISIS DE LA CIUDAD DE MÉXICO

5. METODOLOGÍA PARA DISEÑAR UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO, DISEÑO DE UN MODELO. PROSPECTIVA

- 5.1. ANÁLISIS DEL CONSUMO ELÉCTRICO EN VIVIENDAS DE INTERÉS MEDIO
 - 5.1.1. CONSUMO DOMÉSTICO
 - 5.1.2. ENCUESTA
- 5.2. DETERMINACIÓN DEL MODELO DE VIVIENDA
- 5.3. CÁLCULO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA UNA VIVIENDA DE INTERÉS MEDIO

- 5.3.1. ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE LA VIVIENDA TIPO
- 5.3.2. IRRADIACIÓN SOLAR DEL SITIO
- 5.3.3. DISEÑO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO
 - 5.3.3.1. CAPTACIÓN DE ENERGÍA
 - 5.3.3.2. ACUMULACIÓN
 - 5.3.3.3. REGULACIÓN Y ADAPTACIÓN AL SUMINISTRO ELÉCTRICO
- 5.4. ANÁLISIS DE COSTOS
 - 5.4.1. EVALUACIÓN DEL COSTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO
 - 5.4.2. COSTO DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA
- 5.5. DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO ARQUITECTÓNICAMENTE
- 5.6. PROSPECTIVA SOBRE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
 - 5.6.1. MÉTODO DE ESCENARIOS
 - 5.6.1.1. MATRIZ DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL
 - 5.6.1.2. PLANO DE MOTRICIDAD-DEPENDENCIA
 - 5.6.1.3. JUEGO DE ACTORES
 - 5.6.1.4. ANÁLISIS MORFOLÓGICO
 - 5.6.1.5. CONSTRUCCIÓN DE ESCENARIOS

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

GLOSARIO DE TÉRMINOS

INTRODUCCIÓN

La presente investigación propone el uso de la energía solar para generar electricidad en viviendas en zonas urbanas, con el fin de obtener un ahorro energético, así como beneficios ambientales, sociales y económicos, además de proporcionar a los arquitectos una herramienta para el diseño de los sistemas fotovoltaicos, utilizando como caso de estudio a la Ciudad de México.

La investigación está dividida en cinco capítulos; la primera parte es una introducción al tema en donde se exponen los objetivos y la hipótesis, así como el marco teórico que muestra porque es necesario el uso de las energías renovables, como la energía solar fotovoltaica, debido a la sobreexplotación de los combustibles fósiles, además de que es una manera de disminuir el calentamiento global antropogénico.

También se refiere al porque el ahorro de energía es una tarea que involucra a los arquitectos, ya que en las construcciones se consumen grandes cantidades de energía, durante su construcción, en su vida útil y al terminar dicho ciclo de vida. Se mencionan algunos ejemplos del uso de los sistemas fotovoltaicos en diferentes países y la disponibilidad de energía solar y su uso en la República Mexicana.

El capítulo dos presenta una breve introducción a los conceptos de energía y generación de energía eléctrica. Por otra parte se hace un estudio de las reservas de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero para evaluar las dimensiones del problema en nuestro país y para conocer una forma de disminuirlo: las energías renovables, extendiéndose en el tema de la energía solar.

El tercer capítulo es sobre los sistemas fotovoltaicos, comenzando con una introducción a los principales conceptos sobre electricidad, siguiendo con la historia y funcionamiento de las celdas fotovoltaicas, los diferentes materiales utilizados en su fabricación y los tipos de sistemas.

El cuarto capítulo presenta el marco legal relacionado con la generación de energía eléctrica mediante sistemas fotovoltaicos así como un análisis del uso de las instalaciones fotovoltaicas en México y en otros países. Finalmente se encuentra el análisis de la zona de estudio, la Ciudad de México, comenzando con su ubicación y la irradiación solar que recibe.

El capítulo cinco muestra un ejercicio práctico para viviendas de interés medio en donde se observa el consumo eléctrico estimado por la Comisión Federal de Electricidad, así como por la encuesta realizada; la determinación del modelo de vivienda, con el cual se realiza el cálculo y la estimación de costos, para dar lugar a la metodología de diseño de un sistema fotovoltaico.

La segunda parte del capítulo consiste en el estudio prospectivo, que analiza la evolución de la tecnología fotovoltaica, dando como resultado, después del estudio, un escenario sobre el futuro de dicha tecnología. Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas en éste trabajo de investigación.

¿Por qué ahorrar energía?

Debido a que han mejorado las condiciones de vida y a que la población crece a un ritmo acelerado existe una mayor demanda de vivienda, principalmente en países en vías de desarrollo y en consecuencia hay un mayor consumo de energía. Esta energía es generada principalmente por combustibles fósiles, que son recursos no renovables, lo que representa un

problema a futuro, ya que llegará el momento en que se agoten y la demanda de energía no será cubierta; lo que puede llegar a provocar una crisis energética, como la ocurrida en 1973 cuando hubo un embargo de la exportación de petróleo de la OPEP. Por lo tanto, una alternativa para la generación de energía, es impulsar el uso de las energías renovables o alternas.

Asimismo el uso de combustibles fósiles emite grandes cantidades de bióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera. Éste gas, junto con el vapor de agua (H_2O), el metano (CH_4), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el ozono (O_3) y los clorofluorocarburos (CFC), son responsables del efecto invernadero. El efecto invernadero es un fenómeno natural en el cual los gases mencionados anteriormente retienen parte de la radiación infrarroja de onda larga que es emitida por la Tierra hacia el espacio, debido a que durante el día, la Tierra recibe radiación proveniente del Sol, una fracción es reflejada, pero la mayor parte se absorbe en la superficie y una menor parte en la atmósfera. Gracias a la capa de gases de la troposfera, no se pierde por completo el calor recibido del sol y se mantiene un equilibrio térmico en el planeta¹.

Como consecuencia de los altos niveles de CO_2 generados por las actividades humanas, el efecto invernadero se ha alterado contribuyendo al calentamiento global, que es una teoría que predice un aumento de la temperatura media de la atmósfera terrestre y de los océanos, también es llamado cambio climático antropogénico, ya que se atribuye a las actividades del hombre, principalmente a partir de la Revolución Industrial. Los cambios en el clima que se han producido durante la vida del planeta se debieron a variaciones solares y a la actividad volcánica, dichos cambios se produjeron durante largos períodos de tiempo, sin embargo se han realizado modelos que predicen que si no se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, las temperaturas continuarán subiendo, en un lapso de tiempo menor, lo que puede provocar ondas de calor, un aumento en el nivel del mar y en las lluvias, entre otros fenómenos.²

Para poder dar solución a estos problemas es recomendable impulsar el desarrollo de las energías alternas, una de estas es la energía solar fotovoltaica.

En México la energía solar fotovoltaica se utiliza principalmente en zonas rurales alejadas de la red, para equipos de bombeo e iluminación. Sin embargo estos sistemas pueden instalarse en zonas urbanas en combinación con la red eléctrica o mediante sistemas autónomos, que almacenan la energía generada durante el día en baterías. El presente trabajo propone su uso en las viviendas, ya que la electricidad es el tipo de energía que presenta un mayor consumo, debido al uso de los electrodomésticos, a los equipos de iluminación y de climatización, como puede verse en el desarrollo de ésta investigación, por lo tanto se formula la siguiente hipótesis:

“Si se instala un sistema solar fotovoltaico en viviendas de interés medio, en áreas urbanas, se logrará un ahorro significativo en el consumo de energía eléctrica, permitiendo la recuperación de la inversión usada para su ejecución, obteniendo beneficios energéticos, ambientales e integración arquitectónica.”

Para demostrar la hipótesis, uno de los objetivos de esta investigación es la elaboración de un estudio prospectivo sobre la evolución de los sistemas fotovoltaicos y su uso en viviendas en

¹ Cambio climático en México. Instituto Nacional de Ecología. Disponible en:
http://cambio_climatico.ine.gob.mx

²Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group I : The physical Basis of Climate Change

zonas urbanas. La prospectiva permite plantear diferentes escenarios para una situación determinada; por lo que se puede obtener un escenario deseable en donde el uso de los sistemas fotovoltaicos sea más accesible y puedan instalarse en las ciudades, gracias al desarrollo tecnológico, que lleva a una disminución de costos y a una mayor eficiencia, lo que requiere, a su vez, de una normatividad adecuada.

Deben de identificarse las necesidades, reales, actuales y futuras, a las que se debe responder, para desarrollar los diferentes escenarios, que sirvan de referencia para lograr el objetivo de una vivienda autosuficiente que genere su propia electricidad.

Otro de los objetivos, es desarrollar una metodología, para contar con los conocimientos básicos sobre la energía solar y el diseño de sistemas fotovoltaicos; que sirva como herramienta para los arquitectos que pretendan realizar una instalación de ese tipo, evaluando la factibilidad de la instalación para poder realizar diseños orientados a la autosuficiencia energética y a la reducción del uso de recursos no renovables, así como de las emisiones de CO₂. Con la ayuda de un caso práctico, aplicado a viviendas de interés medio, debido al costo actual de la tecnología.

Considerando los trabajos más importantes que se han hecho sobre el ahorro de energía en viviendas, en diferentes países en donde la tecnología ha tenido un mayor desarrollo, se puede analizar su evolución, evaluar los logros obtenidos y detectar los problemas por solucionar, para finalmente valorar el uso de los sistemas fotovoltaicos en la Ciudad de México, en comparación con otras ciudades y conocer las posibilidades de dicha tecnología y los retos futuros.

1. MARCO TEÓRICO

Debido a que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, principalmente el bióxido de carbono, alteran el efecto invernadero y son consideradas un factor importante en el cambio climático, las Naciones Unidas han tomado acciones al respecto, una de ellas fue la realización de “La Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo”, también conocida como la “Cumbre de la Tierra” (Río de Janeiro, 1992). El principal logro de la Conferencia fue el acuerdo sobre la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, que más tarde llevaría al Protocolo de Kioto.

El Protocolo de Kioto se firmó en 1997, donde los países industrializados se comprometen a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 5%, entre 2008 y 2012 tomando como referencia los niveles de 1990. El Protocolo prevé distintas obligaciones de recorte o aumento de la contaminación que en conjunto garantizan la reducción del 5.2%. El Protocolo impone castigos a los países que no cumplan teniendo que reducir en el siguiente período posterior a la falta, la cantidad incumplida multiplicada por 1.3.

El Protocolo de Kioto aprobó el uso de 3 mecanismos para el logro de los objetivos de reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Estos fueron:

1) Comercialización de Emisiones, de esta manera, las Partes del Anexo I (países industrializados y países con economías en transición de mercado) que reduzcan sus emisiones más de lo convenido podrán vender los créditos de emisiones excedentes a los países que consideren más difícil cumplir sus objetivos.

2) El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), es un mecanismo que permite la creación de Certificados de Reducciones de Emisiones (CERs), también conocidos como bonos de carbono, mediante proyectos de reducción regulados por el Comité Ejecutivo MDL. Permite la inversión de un País Anexo I en un País no incluido en el Anexo I, en proyectos de reducción de emisiones o de fijación de carbono.

3) Implementación Conjunta, es la creación de créditos de reducción de emisiones a través de inversiones transnacionales entre países y/o empresas del Anexo 1.

Además del cumplimiento que estos países hicieron en cuanto a la emisión de gases de efecto invernadero se promovió también la generación de un desarrollo sustentable, que consiste en “satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus necesidades”¹ de tal forma que se utilicen también energías alternas para la generación de electricidad (eólica, solar, geotermia, maremotriz, celdas de combustible y biomasa) y así afrontar el problema de el calentamiento global. En la Tabla 1.1 puede verse como el uso de energías alternas produce menores emisiones de partículas contaminantes, los valores más bajos se encuentran en la Solar Térmica y la Fotovoltaica. Por lo que es conveniente fomentar el uso de este tipo de energías y una forma de llevarlo a cabo es proponer su uso para generar electricidad en las viviendas.

¹ Informe Brundtland, 1987. Comisión Mundial del Medio Ambiente y Desarrollo de Naciones Unidas.

Tabla 1.1 Comparación del Impacto Ambiental de las diferentes formas de Producir Electricidad (en Toneladas por GWh producido):

FUENTE DE ENERGÍA	CO ₂	NO ₂	SO ₂	PARTÍCULAS	CO	HIDRO-CARBUROS	RESIDUOS NUCLEARES	TOTAL
Carbón	1,058.2	2,986	2.971	1.626	0.267	0.102	-	1,066.1
Gas Natural (ciclo combinado)	824	0.251	0.336	1.176	TR	TR	-	825.8
Nuclear	8.6	0.034	0.029	0.003	0.018	0.001	3.641	12.3
Fotovoltaica	5.9	0.008	0.023	0.017	0.003	0.002	-	5.9
Biomasa	0	0.614	0.154	0.512	11.361	0.768	-	13.4
Geotérmica	56.8	TR	TR	TR	TR	TR	-	56.8
Eólica	7.4	TR	TR	TR	TR	TR	-	7.4
Solar Térmica	3.6	TR	TR	TR	TR	TR	-	3.6
Hidráulica	6.6	TR	TR	TR	TR	TR	-	6.6

Fuente: US Department of Energy, Council for Renewable Energy Education y AEDENAT.

TR= trazas.

NOTA: Los valores de emisiones consideran también las emitidas durante el periodo de construcción de los equipos.

La electricidad es el tipo de energía que más se relaciona con el consumo energético en la vivienda, debido al uso de los electrodomésticos y a los equipos de iluminación y de climatización. Actualmente, el sector residencial, comercial y público consume el 19.9% del total de la energía del país, las viviendas representan el 83.5% de ese total, (esto equivale al 16.6% del total de energía que se consume en la República Mexicana)² un sector importante, no sólo por el consumo energético que representa sino por el porcentaje de población que son los usuarios de las viviendas (Figura 1.1). Como consecuencia las edificaciones son responsables, directa o indirectamente, de las emisiones de CO₂³. Por lo que lograr ahorrar energía en las viviendas es de gran importancia.

El ahorro energético puede lograrse mediante el aprovechamiento de la energía solar por medio de celdas fotovoltaicas, ésta actividad se realiza en diferentes partes del planeta, incluso en lugares con menor radiación solar que México. En Alemania el apoyo del gobierno para investigación y desarrollo inició en 1974 y desde entonces ha continuado a través de la fundación Federal Alemana para el Medio Ambiente. En los 90's se lanzó el programa de 1000 techos solares, el cual tuvo una sobre demanda lo que motivo al gobierno Alemán a redimensionar el programa y llegar hasta los 2000 sistemas y en 1991 se promulgo una ley de inyección de electricidad a la red.

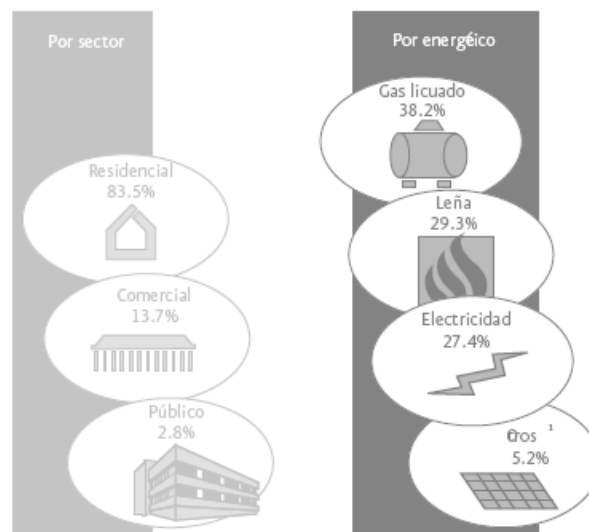


Figura 1.1 Consumo de energía del sector residencial comercial y público 2006 (participación porcentual). Fuente: Balance Nacional de Energía 2006. SENER

² SENER 2006, Balance nacional de Energía, México

³ EDWARDS, Brian. "Guía Básica de Sostenibilidad". Versión castellana de Sandra Sanmiguel Sousa. Editorial Gustavo Gili S.A., Barcelona 2004

En Japón se han llevado a cabo varios programas como el Programa de Diseminación de Sistemas fotovoltaicos residenciales el cual está enfocado a subsidiar los costos de instalación de los sistemas instalados por personas, quienes a cambio del subsidio deberán ser promotores de la tecnología y proveer los datos operativos de sus sistemas. De 1992 a 1999, la demanda anual de módulos fotovoltaicos ha crecido a una tasa superior al 40%. A partir de 1999 se autorizó el uso de módulos fotovoltaicos como material para techos en casas habitación.

En Estados Unidos a principios de 1998 el Departamento de Energía lanzó el programa “Million Solar Roofs Initiative”, el cual está enfocado a instalar un millón de sistemas solares, fotovoltaicos o térmicos en los techos de casas habitación y en edificios comerciales para finales del 2010⁴.

También en América Latina se pueden encontrar ejemplos de la aplicación de Sistemas Fotovoltaicos. En Bariloche, Argentina, se encuentra una vivienda de 244m², construida por el centro de Investigación de Hábitat y Energía de la Universidad de Buenos Aires. La mayor cantidad de sol que recibe son 7.8 horas en verano, pero sólo 1.7 en invierno, el arreglo de las celdas ha sido especificado para alcanzar el más alto nivel de captación solar en primavera y otoño. El sistema fue calculado para proveer un tercio de la demanda anual de electricidad de la casa y consiste en 16 paneles con una capacidad para una demanda máxima de 700W/hr/día. Las celdas están conectadas en paralelo a la red de energía, para que cuando el sistema falle la casa tome energía de éste por medio de procesos automatizados⁵.

Energía Solar en México

En la Ciudad de México podemos encontrar una aplicación de un sistema fotovoltaico en el Parque Ecológico de Loreto y Peña Pobre, donde se construyó la Casa Solar Autosuficiente, por la Fundación El Manantial I.A.P. gracias al apoyo de diversas instituciones, como la Lotería Nacional, el Gobierno del Distrito Federal, la Universidad Metropolitana, Condumex, el Instituto de Ingeniería de la UNAM, Universum, IBM y Solarmex. Es una construcción de 70m², no habitada, se utiliza para mostrar a los visitantes el uso doméstico de la energía solar para la generación de energía eléctrica y calentamiento de agua, el funcionamiento y uso de técnicas bioclimáticas, como evitar el desperdicio y contaminación del agua, reciclaje de aguas negras y la separación de desechos orgánicos e inorgánicos. Con el uso de celdas fotovoltaicas la casa logra generar su propia electricidad en un 70%.

Otro ejemplo del uso de sistemas fotovoltaicos, es el realizado por el Gobierno del Estado de Baja California con el apoyo del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IEE) en viviendas de interés social. El gobierno del estado busca dar una solución al problema de los altos pagos por consumo de energía eléctrica en las viviendas en Mexicali. El programa tiene contemplado instalar el sistema para 220 viviendas de interés social del Fraccionamiento Valle de las Misiones, considerando 1 KW de capacidad instalada por vivienda, el resto de la energía necesaria para el funcionamiento de los aparatos eléctricos será complementada por la energía proveniente de las instalaciones de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Cuando la energía generada es mayor que la requerida por la vivienda, el excedente de energía pasa al sistema de la CFE y se registra (se descuenta) por el medidor bidireccional. El modelo no resultó viable para viviendas de interés social como las de Valle de las Misiones,

⁴ AGREDANO DIAZ, Jaime. “Prospectiva de la Energía Solar Fotovoltaica para la generación de Electricidad”. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Energías no convencionales.

⁵ ROAF, Sue, FUENTES, Manuel y THOMAS Stephanie. “Ecohouse a Design Guide”. Architectural Press. Linacre House, Jordan Hill, Oxford. 2001.

que tienen un costo aproximado de 178,000 pesos, debido a que el sistema tuvo un costo cercano a los 80,000 pesos. Por lo que se consideró que es más conveniente para vivienda media y residencial⁶.

El conocimiento general que se tiene de la energía solar en nuestro país indica que más de la mitad del territorio nacional presenta en promedio, una densidad energética de 5kW/h por metro cuadrado al día. En la República Mexicana la tecnología fotovoltaica se utiliza principalmente para aplicaciones de baja potencia en sitios alejados de la red eléctrica, aunque existen ejemplos de su uso en viviendas en zonas urbanas. Considerando eficiencias del 10% para los dispositivos en el mercado, se puede decir que con 200km² de área de colección de radiación solar se podría dar electricidad a todos los hogares de México⁷.

Los datos de la Tabla 1.2 corresponden a los registros que se han obtenido en las diferentes estaciones meteorológicas instaladas en el Distrito Federal y el Estado de México. Como puede observarse, la irradiación media anual en nuestro país, es del orden de los 5 kWh/m²-día, un valor que se encuentra entre los más altos registrados en el planeta y comparado con los países que aprovechan más la energía solar como Alemania que tiene una irradiación entre 1kWh/m²-día y 2kWh/m²-día o Japón con valores entre 2kWh/m²-día y 3kWh/m²-día⁸, puede decirse que es factible el aprovechamiento de la energía solar en nuestro país.

Tabla 1.2. Irradiación Global Media en la República Mexicana. Datos en kWh/m²-día

ESTADO	D.F.	MÉXICO	MÉXICO	MÍNIMO	MÁXIMO	PROMEDIO
CIUDAD	TACUBAYA	TOLUCA	CHAPINGO			
Ene	4.4	4.4	4.5	3.1	5.4	4.1
Feb	5.2	4.9	5.1	3.3	6.3	4.7
Mar	5.8	5.3	5.6	3.1	6.6	5.3
Abr	5.8	5.4	5.8	3.8	7.5	5.7
May	5.7	5.2	5.9	4.1	8.3	5.9
Jun	5.1	5.2	5.4	4.4	8.6	5.6
Jul	4.9	4.9	5.2	4.5	7	5.6
Ago	4.9	4.9	5.2	4.5	6.6	5.5
Sep	4.7	4.6	5	4.1	6.7	5.1
Oct	4.4	4.4	4.7	3.5	6	4.7
Nov	4.2	4.2	4.6	3.1	5.7	4.3
Dic	3.8	3.9	3.9	2.8	5.6	3.8
Min	3.8	3.9	3.9	2.8	5.4	3.8
Max	5.8	5.4	5.9	4.5	8.6	5.9
Promedio	4.9	4.8	5.1	3.7	6.7	5

Referencia: Comisión Nacional para el Ahorro de Energía. Disponible en <http://www.conae.gob.mx>

En México el Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV) por medio del Departamento de Ingeniería Eléctrica en su sección de Electrónica del Estado Sólido logro el primer módulo solar en América Latina e inició la manufactura de celdas fotovoltaicas y su ensamble en módulos, se llevan a cabo investigaciones de celdas

⁶ Gobierno del Estado de Baja California. "Sistemas Fotovoltaicos conectados a la Red Eléctrica". Disponible en <http://genc.iiie.org.mx>

⁷ Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE)

⁸ ŠÚRI M.,[et al.], 2007. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. Solar Energy, 81, 1295-1305, Disponible en <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgris/>.

solares de silicio cristalino y amorfo, así como otros materiales policristalinos. Algunas otras instituciones como el Centro de Investigación de Energía de la UNAM a través del Departamento de Materiales Solares, estudia el desarrollo de materiales fotovoltaicos, con líneas de investigación sobre películas delgadas, desarrollo de celdas solares y materiales, entre otras investigaciones, así como la evaluación de los sistemas fotovoltaicos. El Instituto de Investigaciones Eléctricas inició en 1979 una investigación relacionada con la ingeniería de plantas fotovoltaicas. Actualmente los trabajos de investigación se han dirigido hacia dos campos principales: sistemas fuera de red y los sistemas híbridos, solar-eólico diesel.

Energía Solar y Celdas Fotovoltaicas.

El sol es una fuente de energía natural y renovable, es una estrella cuya superficie se encuentra a una temperatura media de 5500° K, la energía solar se produce por fusión nuclear, en este proceso los núcleos de los átomos de hidrógeno se transforman en helio, liberando grandes cantidades de energía. A través de la convección y la radiación, la energía del núcleo alcanza la superficie solar y se desprende en forma de luz y calor. La radiación solar que llega a la superficie de la Tierra puede transformarse en electricidad o calor. El calor, a su vez, puede ser utilizado directamente para producir vapor y generar electricidad.

La radiación solar puede ser transformada en electricidad mediante el uso de celdas fotovoltaicas, dichas celdas son dispositivos basados en la acción de radiaciones luminosas sobre materiales semiconductores. En 1839, el físico francés Alexandre Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico, utilizado en las celdas, dicho efecto crea una fuerza electromotriz en el metal, cuando un fotón entra en contacto con un electrón del material semiconductor, si tiene suficiente energía, lo desprende, produciendo corriente eléctrica, por esta razón los semiconductores son utilizados para la conversión de energía solar en energía eléctrica.

La explicación científica para el hecho de que la luz puede ser convertida directamente en electricidad, fue enunciada por Albert Einstein en 1905. Su ensayo sobre la ley del “efecto fotoeléctrico” de 1905, estableció las bases de la teoría fotovoltaica moderna. Finalmente, las celdas solares modernas fueron creadas por Calvin Fuller y Gerald Pearson junto con su colega Darryl Chapin, los investigadores presentaron su “Aparato de Conversión de Energía Solar” de silicio en 1953⁹, demostrando que se puede obtener energía eléctrica a partir de la luz solar mediante un proceso artificial. El desarrollo de las celdas fotovoltaicas ha tenido grandes avances gracias a las investigaciones de científicos de la NASA para el abastecimiento de energía en satélites y estaciones espaciales.

La celda fotovoltaica es un dispositivo capaz de convertir la luz en electricidad, de una forma directa e inmediata. Las celdas fotovoltaicas más utilizadas están hechas a base de silicio monocristalino.

Actualmente, la tecnología de las celdas solares puede ser dividida en tres grandes grupos: el primer grupo corresponde a las celdas ya mencionadas de silicio cristalino que dominan el mercado actual por ser más eficientes, llegando a tener un rendimiento del 20%, y que se encuentra en mejoras constantes. El segundo grupo comprende a las celdas de película delgada, que pueden o no, ser de silicio cristalino. Dentro de las celdas de capa delgada se destaca el uso del silicio amorfo por ser más económico aunque presenta la desventaja de un rendimiento menor al del silicio mono o policristalino; esta tecnología continua en proceso de investigación. Finalmente tenemos a las celdas que no siguen el esquema de funcionamiento de los dispositivos anteriores. Se trata de un conjunto de celdas solares colocadas en capas,

⁹ ALCOR CABRERIZO, Enrique “Instalaciones solares fotovoltaicas”. 3ª. Edición. España: Progensa 2002

compuestas de diversos materiales, con diferentes valores de absorción de los fotones, la primera capa absorbe los fotones con mayor energía, los fotones con menor energía son absorbidos por la segunda capa y así sucesivamente. Con el desarrollo de esta tecnología se han logrado rendimientos hasta del 30% en laboratorio. Este tipo de celdas tienen un costo elevado y continúan en proceso de investigación.

A su vez los sistemas fotovoltaicos pueden ser divididos en dos grandes grupos: los sistemas autónomos y los sistemas conectados a la red. Se entiende por sistema autónomo aquel que genera por completo la electricidad que se le demanda y que es almacenada en baterías. El sistema conectado a red, como su nombre lo indica, está interconectado a la red general de distribución eléctrica de donde toma electricidad en caso de necesitarla o bien, inyectando los excedentes a la red.

Ambos sistemas requieren de los siguientes componentes básicos para su funcionamiento:

Celda fotovoltaica: Unidad básica y más pequeña de un sistema fotovoltaico: Se fabrican de diferentes materiales, el más utilizado actualmente es el silicio, generalmente de forma cuadrada con tamaños entre los 10 y 15cm.

Módulos fotovoltaicos: Generalmente se fabrican con potencias que van desde los 50W hasta los 200W. Consisten en celdas conectadas eléctricamente y encapsuladas entre un material transparente y un material plástico en la parte posterior. Las celdas de película delgada utilizan un material delgado que se encapsula para formar módulos flexibles con material transparente en la parte frontal. Los módulos fotovoltaicos de silicio generalmente están constituidos de: cubierta exterior, capa encapsulante anterior, celdas fotovoltaicas, capa encapsulante posterior, protección posterior, marco soporte y contactos eléctricos de salida.

Arreglo fotovoltaico: Está formado por varios módulos agrupados y conectados entre sí. Existen paneles de 6V, 12V y 24V, con potencias entre los 2.5W y los 180W.

El tipo de conexión (serie o paralelo) dependerá de los requerimientos de potencia, con las características de corriente y voltaje requeridas, según el proyecto que se vaya a realizar.

Para realizar el diseño de un sistema fotovoltaico primero debe elegirse el sistema más adecuado para la vivienda, para después determinar el promedio diario de luz solar en el sitio y el plano de ubicación de los módulos así como la inclinación de los mismos. Los datos más importantes son los de la irradiación global diaria. El siguiente paso consiste en determinar la carga total de energía que se consume por día, con este valor se determina el perfil de la carga eléctrica y así se dimensiona el sistema.

En lo que respecta a los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica las investigaciones se han enfocado a sistemas que pueden ser utilizados para dar soporte y alivio térmico a líneas de distribución en zonas con grandes picos de demanda. Un problema de las centrales generadoras de electricidad se halla en que funcionan al 100% en ciertos momentos pico del día, mientras que en horas nocturnas, su funcionamiento es mucho menor. Esto hace que el precio por kilowatt hora producido sea bajo cuando la central rinde toda su potencia y considerablemente más alto cuando su funcionamiento está en un 50% de su potencia nominal.

En el caso ideal de una central eléctrica que estuviera rodeada de viviendas con sistemas fotovoltaicos y fueran capaces de proporcionar energía suficiente para que los picos de demanda, que generalmente se producen durante el día, fueran suministrados por medio de la

energía producida por los módulos, la central hipotética podría ser de una potencia que rindiera siempre el 100%. De esta forma el costo de producción sería más barato que el de una central con producción variable y menos contaminante. Una ventaja más es que se evitarían las pérdidas por transporte de energía generada ya que se produciría en donde se consume.

En un principio, los sistemas conectados a la red se diseñaron y calcularon para centrales fotovoltaicas; después de observar que funcionaban correctamente y con los avances tecnológicos, se comenzó a pensar en instalaciones más pequeñas, que pudieran ser utilizadas en viviendas con una acometida habitual de electricidad.

En el caso de una vivienda, con un sistema fotovoltaico conectado a la red, la electricidad que se consume puede ser proporcionada en el día por las celdas solares y durante la noche por la red eléctrica. En el caso de que el sistema no pueda proporcionar la energía necesaria, esta puede ser tomada en cualquier momento de la red.

Los sistemas fotovoltaicos que están conectados a la red evitan el uso de baterías, que es la parte del sistema que puede constituir desde el 10% del costo, dependiendo de las dimensiones del sistema. Los principales componentes de los sistemas conectados a la red son: el generador fotovoltaico que convierte la luz del sol directamente en energía eléctrica y un inversor de corriente. El inversor de corriente transforma la corriente continua generada por el sistema fotovoltaico, en corriente alterna, sincronizada con la red eléctrica.

La presente investigación propone una metodología, para que los arquitectos puedan dimensionar un sistema de este tipo de forma sencilla, además de familiarizarse con los principales conceptos, después de la realización de un caso práctico en donde se desarrolle la solución de un sistema fotovoltaico.

La mayoría de los sistemas fotovoltaicos instalados en México se encuentran en zonas rurales, sin embargo el caso de estudio se propone en una zona urbana, la hipótesis planteada es la siguiente:

“Si se instala un sistema solar fotovoltaico en viviendas de interés medio, en áreas urbanas, se logrará un ahorro significativo en el consumo de energía eléctrica, permitiendo la recuperación de la inversión usada para su ejecución, obteniendo beneficios energéticos, ambientales e integración arquitectónica.”

Por medio del caso práctico se pretende demostrar la factibilidad de su uso en áreas urbanas utilizando como ejemplo la “Zona Metropolitana de la Ciudad de México”, que es el área urbana formada por el Distrito Federal y 27 municipios pertenecientes al Estado de México, los cuales se han unido al área urbana del Distrito Federal¹⁰.

La ubicación de un sistema solar fotovoltaico en áreas urbanas como la zona propuesta es factible, por ser una de las ciudades en donde se consumen grandes cantidades de energía y la propuesta para el uso de energías alternas puede ayudar a disminuir la dependencia de los recursos no renovables.

Debido a los costos actuales de la tecnología, la propuesta de instalación de un sistema fotovoltaico en desarrollos de viviendas de interés medio es más factible que en viviendas de

¹⁰ VILLAVICENCIO BLANCO, Judith y DURAN CONTRERAS, Ana María. “Treinta años de vivienda social en la ciudad de México: nuevas necesidades y demandas” Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales. Universidad de Barcelona. ISSN: 1138-9788. Depósito Legal B. 21.741-98 Vol. VII, num. 146(028), 1 de agosto de 2003. Disponible en [http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-146\(028\).htm](http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-146(028).htm)

interés social. Los créditos que se otorgan para viviendas de interés social no deben de rebasar el valor de 180 veces el salario mínimo mensual, lo que equivale en el Distrito Federal a 295,900 pesos¹¹, aproximadamente, y la instalación de las celdas solares incrementaría el valor de la vivienda entre un 17% y un 25%, dificultando la autorización de créditos para este tipo de edificaciones.

Por otra parte, en las viviendas consideradas de interés medio con un valor mayor a 350 veces el salario mínimo, que equivale a 583,072 pesos¹², en el Distrito Federal, la aplicación de paneles fotovoltaicos para cubrir solo las necesidades de iluminación con el apoyo de lámparas ahorradoras incrementaría el valor de la vivienda en un rango del 8% al 15%, permitiendo a los constructores cubrir los gastos, quedando el costo aun dentro del valor de vivienda de interés medio considerado por las instituciones bancarias para el otorgamiento de créditos, con la ventaja de que durante su ciclo de vida los paneles generarían electricidad a menor precio ya que el mantenimiento y costos de operación serían menores.

El uso de ésta tecnología permitirá a los usuarios disminuir su consumo energético generando su propia electricidad, reduciendo el uso de combustibles fósiles y las emisiones de CO₂.

Como cualquier otra instalación eléctrica, debe realizarse adecuadamente y en forma segura, tanto la conexión como la desconexión eléctrica del sistema fotovoltaico, para proporcionar la protección adecuada del equipo y de las personas. Por lo que deben seguirse las normas y recomendaciones establecidas.

La Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE), no permite a los particulares la libre compra-venta de energía, pero sí su generación, para autoabastecerse, sujetos a permiso de la Comisión Reguladora de Energía (CRE). De acuerdo con la legislación vigente, los particulares que generan electricidad en sistemas de menos de 0.5 MW no requieren de permiso.

En Diciembre del 2005 se aprobó en la Cámara de Diputados la iniciativa de Ley para el Aprovechamiento de las Fuentes Renovables de Energía (LAFRE), en la que se establece la creación de un Programa para el Aprovechamiento de las Fuentes Renovables de Energía. Tiene como meta, para el 2012, un porcentaje mínimo de participación de las Energías Renovables, en sus distintas modalidades, respecto a la generación total de electricidad, del 8%.

Un avance significativo se dio el 27 de junio del 2007 cuando se hizo oficial que cualquier particular o pequeño negocio podrá generar electricidad con celdas solares para autoconsumo. Por medio de un medidor bidireccional se registran los excedentes, que se podrán subir a la red de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) o Luz y Fuerza del Centro (LFC) y tener un crédito a su favor cuando, por las noches, utilice la energía producida por CFE o LFC¹³.

Como toda tecnología los sistemas fotovoltaicos presentan algunos inconvenientes ya que no son aun económicamente competitivos para la mayoría de las aplicaciones, especialmente en instalaciones de escala media y grande; los costos de la generación mediante sistemas fotovoltaicos son muy variables y dependen del sitio donde se instalan. La temperatura ambiente y el porcentaje de irradiación son factores que afectan la producción de energía. A menores costos de inversión y mayores niveles de irradiación el costo de la energía producida

¹¹ Valor del salario mínimo = 54.80 pesos. Marzo 2009

¹² INFONAVIT. <http://www.infonavit.gob.mx>

¹³ Contrato de Interconexión para fuente de energía Solar en Pequeña Escala. Diario Oficial de la Federación 27 de Junio de 2007

mediante paneles fotovoltaicos disminuye. Otro inconveniente es que para la manufactura de cierto tipo de celdas se requiere el manejo de sustancias que pueden ser nocivas para el ambiente, además de que las tecnologías de producción están controladas por los países industrializados.

La integración de los sistemas fotovoltaicos en las construcciones debe ser considerada por los arquitectos, actualmente existen proyectos donde se utilizan como parte del diseño en fachadas o en cubiertas, además de que se están fabricando varios productos desarrollados específicamente para la instalación de los módulos fotovoltaicos en las edificaciones, facilitando su integración, como estructuras para montar fachadas, perfiles para tejados, techos planos, tejas fotovoltaicas que pueden reemplazar a las tejas normales, ventanas que proporcionan sombra y dejan pasar la luz, losetas, entre otros productos, que se encuentran en proceso de investigación.

Estos diseños se ven favorecidos por el uso de celdas de capa delgada, que aun siendo de más bajo rendimiento, permiten mayores posibilidades estéticas, ya que pueden ser fabricados en distintos colores y colocarse sobre los acabados.

Norman Foster and Partners en colaboración con Norbert Kaiser han desarrollado un prototipo de celosía con celdas fotovoltaicas integradas utilizable como persianas o elementos plegables los dispositivos que dan sombra son soportes ideales para las celdas al encontrarse expuestos al sol y al poderse orientar según las condiciones lumínicas y la altura del sol¹⁴.

Durante los últimos 30 años el desarrollo tecnológico en este campo ha permitido una reducción de un 95% en el costo de los módulos fotovoltaicos comerciales, así como un incremento cercano al 200% en su eficiencia. Un dato que puede servir como referencia para dimensionar el nivel de penetración de esta tecnología en estos últimos años son los más de 1200 MW de potencia pico instalada a nivel mundial, con un crecimiento anual del orden de 16%¹⁵. En un principio, la inversión para la creación de las celdas solares era elevada y el costo del kilowatt estaba en 1994 alrededor de los once dólares; ahora el costo se encuentra en 4.85 dólares/watt, y continúa a la baja¹⁶.

Los ejemplos de sistemas fotovoltaicos en diferentes países, que incluso reciben menor radiación solar que México, demuestran que con el uso de energías alternas pueden obtenerse beneficios, como el ahorro de energía, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, así como fomentar el desarrollo de la tecnología y así, poder disminuir los costos de producción.

La tecnología fotovoltaica es de fácil instalación y con un mantenimiento adecuado pueden tener un tiempo de vida hasta de 25 años. La energía que se obtiene directamente del sol es una energía limpia que se genera en el lugar, por lo que hay pocas pérdidas, aunque presenta el problema de no ser constante debido a las condiciones climatológicas.

¹⁴ Sophia y Stefan Behling, Bruno Schindler, "Sol Power". Editorial Gustavo Gili, SA Barcelona, 2002

¹⁵ GONZÁLEZ G, Raúl, LIMÉNEZ G, Humberto R. y LAGUNAS M., Javier. "Sistemas fotovoltaicos conectados a la red" Boletín IIE, octubre-diciembre del 2003

¹⁶ © 2008 Solarbuzz, LLC. Solar Module Price Highlights: November 2008. Disponible en <http://www.solarbuzz.com>

2. ANTECEDENTES

Para poder entender por qué es importante el ahorro energético, es necesario conocer la definición de energía, la importancia de la energía eléctrica, como se genera y los problemas que trae consigo dicha generación, así como las posibles soluciones, como el uso de las energías alternas o renovables.

2.1 GENERACIÓN DE ENERGÍA

El concepto de energía tiene varias definiciones, todas ellas correctas y relacionadas entre sí, en física se define como la causa capaz de transformarse en trabajo mecánico.

La energía es una de las partes fundamentales del universo, el cual está básicamente compuesto por materia y energía. La fórmula de Einstein " $E=mc^2$ " nos dice que la materia se puede convertir en energía y viceversa. Sin embargo, se afirma que lo único que se logra en ese caso es liberar la energía contenida en los enlaces del átomo y no propiamente que la materia se convierta en energía¹⁹.

La ley de la conservación de la energía propuesta por Lavoisier y que ha sido perfeccionada por otros científicos a través del tiempo, nos dice básicamente que "La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma", este principio se aplica a la primera ley de la termodinámica que nos indica que la energía en forma de calor puede transformarse en trabajo mecánico y almacenarse.

Sin embargo al transformarse la energía en calor para producir un trabajo, el calor no puede convertirse nuevamente al 100% en la energía original, hay una "pérdida" de energía que se mantiene como calor, y a esto se le denomina la Segunda Ley de la Termodinámica o bien "Ley de la Entropía", según la cual llegará el momento en que toda la energía del universo se convertirá en calor no reversible.

La energía presenta diferentes manifestaciones que nos proporcionan diferentes beneficios como calor, iluminación, movimiento, electricidad, etc. Ahora bien, la electricidad es la principal fuente de energía directamente usada por muchos seres humanos, se puede estimar que el 40% de la población humana tiene acceso a redes de distribución eléctrica²⁰.

El consumo de esta forma de energía se ha convertido en uno de los índices para medir el desarrollo de un país o región. La energía eléctrica es una energía limpia y versátil que se puede convertir fácilmente en cualquier otra forma de energía: mecánica, térmica o química y es relativamente fácil de transportar a través de largas distancias, con pocas pérdidas. Actualmente la generación eléctrica se hace en corriente alterna, ya que esta permite fácilmente los cambios de voltaje que optimizan la distribución y el consumo. Por otra parte hay que tener en cuenta que no es rentable generar energía que no será consumida ya que no es sencillo almacenarla, por lo que lo más conveniente es generar en función de la demanda y optimizar la producción mediante diferentes formas de generación.

La energía eléctrica que utilizamos está sujeta a distintos procesos de generación, transformación, transmisión y distribución. Estos procesos pueden ser mediante el uso de caídas de agua o utilizando calor, para producir vapor y mover turbinas. Para producir el calor que de movimiento a las turbinas se emplean: combustibles fósiles, la geotermia, la energía

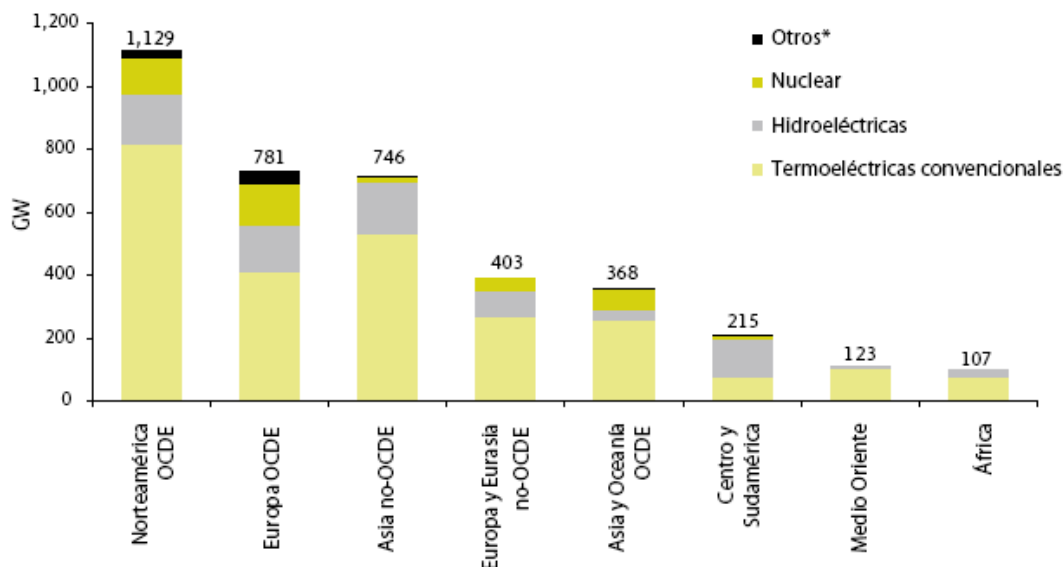
¹⁹ CONAE. Comisión Nacional para el Ahorro de Energía. <http://www.conae.gob.mx>

²⁰ SENER. Secretaría de Energía. <http://www.sener.gob.mx>

nuclear, la biomasa y las energías renovables como la solar, la energía eólica se utiliza para mover turbinas sin la necesidad de generar calor.

La mayor parte de la energía eléctrica mundial se genera en plantas termoeléctricas²¹, como puede verse en la Figura 2.1, que muestra la producción en diferentes grupos de países clasificados en base a su participación en la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). Puede verse la mayor participación de las termoeléctricas, principalmente en la zona de Norteamérica que comprende a Estados Unidos, México y Canadá.

Figura 2.1 Capacidad mundial instalada para generación de energía eléctrica por región y tecnología (GW) 2005



Fuente: Energy Information Administration, Department of Energy USA

Las plantas termoeléctricas utilizan generadores que son movidos por energía mecánica proveniente de la transformación del calor obtenido principalmente por la combustión. La mayoría de los combustibles son fósiles, los más utilizados son el carbón, el gas natural y el combustóleo, que constituyen fuentes no renovables de energía y emiten grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera.

La producción de los combustibles que se usan para la obtención de electricidad es una de las más importantes que existen, desde el punto de vista económico y tecnológico. Los hidrocarburos fósiles son el resultado de millones de años de modificaciones en sustancias de origen animal y vegetal, llevadas a grandes profundidades por los movimientos tectónicos.

El primer combustible fósil utilizado fue la leña, hasta la edad media cuando en Europa comenzó a usarse el carbón para generar vapor y fuerza motriz. El carbón mineral fue el combustible característico de la Revolución Industrial y su explotación a gran escala comenzó a principios del siglo XVIII. El carbón como el petróleo es también el residuo fósil de la

²¹ SENER. "Prospectiva del Sector Eléctrico" 2007-2016

modificación de sustancias orgánicas, sobre todo vegetales, de diversas épocas. Se explota a cielo abierto cuando es posible o en minas.

El carbón es el combustible dominante para la producción de electricidad en el mundo, en el 2005 tuvo una participación del 48% en la generación de electricidad²².

La generación eléctrica a partir de gas natural ha crecido durante las últimas dos décadas y se prevé que durante los próximos años los combustibles de mayor utilización sean el carbón y el gas natural y que disminuya el uso de combustible derivados del petróleo como el combustóleo.

El calor para generar el vapor que actúa sobre una turbina puede provenir de la energía nuclear, a partir de una reacción de fisión en cadena, controlada dentro de un reactor nuclear. La reacción de fisión se produce al partir los núcleos atómicos de elementos como el uranio, mediante el bombardeo de los núcleos con neutrones. En la reacción se produce un gran desprendimiento de energía calorífica y electromagnética. Sin embargo el uso de la energía nuclear para generar electricidad produce residuos radioactivos que pueden provocar serios daños a los seres vivos, por lo que su uso es cuestionable.

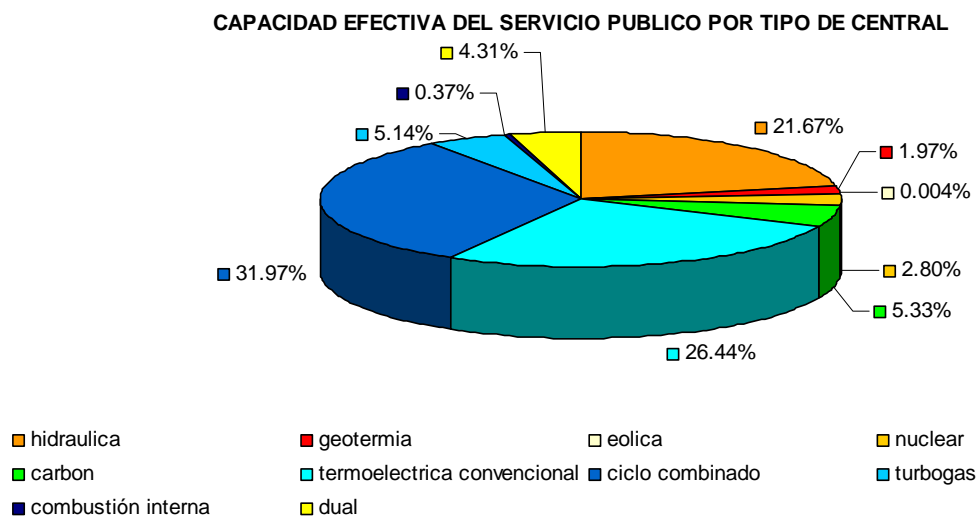
Otra de las formas de generar electricidad es mediante el uso del agua, la generación hidroeléctrica como su nombre lo indica, es aquella que utiliza la energía potencial del agua para generar electricidad. Actualmente la energía hidroeléctrica es una de las fuentes más importantes de producción de electricidad, en la mayoría de los países que poseen grandes ríos, se aprovechan las corrientes de agua colocando en su camino turbinas, de modo que la energía del agua las haga girar.

En México el Sistema Eléctrico Nacional está conformado por dos sectores, el público y el privado. En el sector público se encuentra la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y Luz y Fuerza del Centro y las centrales construidas por los Productores Independientes (PIE). El sector privado agrupa las modalidades de cogeneración, autoabastecimiento, usos propios y exportación.

La figura 2.2 muestra como se distribuye la producción de electricidad, puede verse que la generación termoeléctrica mediante el uso de combustibles fósiles tiene la mayor participación, en este proceso se incluye al carbón, la combustión interna, el proceso dual que utiliza carbón y combustóleo, el turbogas y el ciclo combinado, que posee el mayor porcentaje, debido a que es considerado el proceso más eficiente, ya que funciona a partir de la integración de dos tipos de unidad generadora: vapor y turbogas. Las fuentes de energía renovable que se basan en los ciclos naturales como la hidráulica, la geotermia y la eólica contribuyen con el 24% aproximadamente.

²² SENER. "Prospectiva del Sector Eléctrico" 2007-2016

Figura 2.2 Capacidad efectiva del servicio público por tipo de central



Fuente: Comisión Federal de Electricidad (CFE)

De acuerdo al balance nacional de energía 2006 la electricidad ocupa el 3er lugar en el consumo final de energía con el 14.9%. El consumo interno de energía eléctrica se divide en cinco sectores: industrial, residencial, comercial, servicios y bombeo agrícola. El sector industrial es el de mayor consumo seguido del residencial con un consumo del 25.3% del total de la energía eléctrica²³.

Si bien la electricidad ocupa el tercer lugar, es el tipo de energía más utilizada en las viviendas debido al uso de electrodomésticos, iluminación y aire acondicionado. Por lo anterior es importante considerar ahorrar en el consumo energético en las viviendas, que constituyen una parte importante del consumo total de energía en el país.

El consumo de energía eléctrica varía enormemente entre los diferentes países del planeta y continuará creciendo debido a que habrá mayores necesidades de iluminación, acondicionamiento doméstico y en general por los sistemas y dispositivos que están asociados a una mejor calidad de vida de la población. Por ello debe tomarse en cuenta que las formas actuales de generar electricidad no pueden durar por mucho tiempo; la energía hidroeléctrica es limitada y la de generación térmica está limitada a la disponibilidad de combustibles fósiles. Por otra parte la combustión de gas, petróleo y carbón agravarán la acumulación de los gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Otro problema es el alza en los precios del petróleo y el gas natural. Para solucionar este problema es necesario mejorar la eficiencia en la generación eléctrica y economizar energía además de impulsar el uso de las fuentes alternas de generación de energía, como apoyo a las formas actuales de producir electricidad.

2.2 EMISIONES DE CO₂ EN MÉXICO

Uno de los problemas que trae consigo la generación de electricidad por medios convencionales es la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), principalmente bióxido de carbono (CO₂). Los otros gases de efecto invernadero son el vapor de agua (H₂O), el metano (CH₄), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el ozono (O₃) y los clorofluorocarburos (CFC).

²³ CFE. Comisión Federal de Electricidad.

Debido a los altos niveles de CO₂ generados por las actividades humanas, el efecto invernadero se ha alterado contribuyendo al cambio climático antropogénico. Se han realizado modelos que predicen que si no se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, las temperaturas continuarán subiendo, en un lapso de tiempo menor.

En México existe una política ambiental impulsada por el Instituto Nacional de Ecología (INE), que intenta frenar las tendencias de deterioro del medio ambiente y de los recursos naturales. Se han desarrollado diversas acciones que tratan de disminuir el cambio climático. En la década de los noventa se establecieron diversas acciones en diferentes instituciones para poder contribuir a los objetivos de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, evitando emitir cantidades importantes de gases de efecto invernadero.

México ocupa el catorceavo lugar dentro de los países emisores de bióxido de carbono, debido a la magnitud de su población, la extensión de su territorio y su nivel de desarrollo. Las emisiones totales de CO₂ de México representan tan sólo un 6.27% de las de emisiones de este gas en el mundo²⁴.

México tiene una menor eficiencia energética que la mayoría de los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), aunque dichos países presentan mayores emisiones que México.

Los datos de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) están tomados del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002 México, que incluye cinco de las seis categorías del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (PICC):

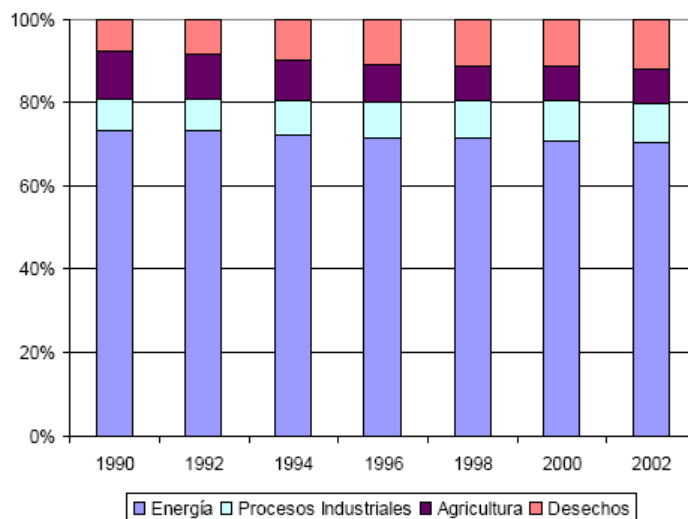
- Energía
- Procesos Industriales
- Solventes
- Agricultura
- Residuos

Para efectos de esta investigación solo se tomarán en cuenta los datos referentes a la energía.

De acuerdo al Inventario Nacional de GEI, las emisiones totales de gases de efecto invernadero en el 2002, dentro de las cinco categorías mencionadas anteriormente, presentan un incremento del 30% en comparación con los valores de 1990. Estas emisiones incluyen los seis principales gases de efecto invernadero contemplados por el Protocolo de Kyoto: bióxido de carbono (CO₂), metano CH₄, óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs) y hexafluoruro de azufre (SF₆). La figura 2.3 muestra la contribución de emisiones de las categorías de: energía, procesos industriales, agricultura y desechos. Puede verse que la energía contribuye con el 60% aproximadamente.

²⁴ INE. Instituto Nacional de Ecología. <http://www.ine.gob.mx>

Figura 2.3 Contribución por categoría de emisión en el periodo 1990-2002



Fuente: Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero, México 1990-2002. INE

La Categoría Energía que es la más importante de los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero de México, se subdivide en consumo de combustibles fósiles y en emisiones fugitivas de metano (tabla 2.1).

Tabla 2.1 Subcategorías de energía

A. CONSUMO DE COMBUSTIBLES FÓSILES	1. Generación de energía
	2. Manufactura e industria de la construcción
	3. Transporte
	4. Otros (Comercial, residencial y agricultura)
B. EMISIONES FUGITIVAS DE METANO	1. Por el minado y manipulación del carbón
	2. Por las actividades del petróleo y gas natural

Fuente: Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero, México 1990-2002. INE

La generación de energía representó en el 2002 el 24% de las emisiones totales del país, el transporte contribuyó con el 18%, la manufactura y la industria de la construcción aportó el 8%, el consumo en los sectores residencial, comercial y agrícola fue del 5%, mientras que las emisiones fugitivas de metano contribuyeron con el 6%, lo que da un total de 61% de emisiones para la categoría de energía. La tabla 2.2 muestra los valores en gigagramos (1 gigagramo = 1,000 toneladas) para las dos subcategorías, en promedio, el consumo de combustibles fósiles representa el 90% de las emisiones correspondientes a la energía.

Tabla 2.2 Emisiones en Gigagramos de CO₂ para el periodo 1990-2002

CATEGORÍA DE EMISIÓN	1990	1992	1994	1996	1998	2000	2002
Energía	312,027.2	321,835.9	342,899.6	349,430.6	394,128.8	398,627.3	389,496.7
B. Consumo de Combustibles fósiles	279,863.7	291,045.5	308,931.8	311,197.1	351,760.2	356,796.3	350,414.3
A. Emisiones fugitivas	32,163.5	30,790.4	33,967.8	38,233.4	42,368.7	41,831.0	39,082.3

Fuente: Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero, México 1990-2002. INE

La categoría de energía aumentó sus emisiones en un 25% entre 1990 y 2002, debido principalmente a un mayor consumo de combustibles fósiles en el país; esta situación se explica por el crecimiento de la economía, que genera un aumento en la demanda de energía.

Como se menciona anteriormente la categoría de energía representa alrededor del 60% de las emisiones de gases de efecto invernadero, dentro de la cual se encuentra la generación de energía equivalente al 24%, por lo que una disminución de emisiones en este rubro puede resultar muy significativo y una manera de lograrlo es impulsando el uso de las energías alternas, además de un uso eficiente de la energía.

2.3 RESERVAS DE HIDROCARBUROS EN MÉXICO

El petróleo y el gas natural constituyen alrededor del 63% del consumo total de energía mundial²⁵. Son recursos no renovables y se puede considerar al petróleo como la principal fuente de energía en los países desarrollados y en vías de desarrollo, sin embargo, su uso genera grandes cantidades de emisiones de bióxido de carbono.

La formación del petróleo está asociada al desarrollo de rocas sedimentarias depositadas en ambientes marinos próximos al mar, es el resultado de procesos de descomposición de organismos de origen vegetal y animal, que en tiempos remotos quedaron incorporados en esos depósitos²⁶.

El petróleo crudo equivalente es una forma utilizada a nivel internacional para representar el inventario total de hidrocarburos. Es la suma de los volúmenes de aceite crudo, de condensados, de los líquidos en planta y del gas seco equivalente líquido²⁷.

La compañía inglesa British Petroleum (BP) ha realizado durante 57 años una revisión estadística de la energía mundial, es una publicación ampliamente respetada y muy utilizada como referencia. En este documento se divide la producción, consumo y reservas de hidrocarburos en seis regiones: Norteamérica, Centro y Sudamérica, Europa y Eurasia, Medio Oriente, África y Asia Pacífico.

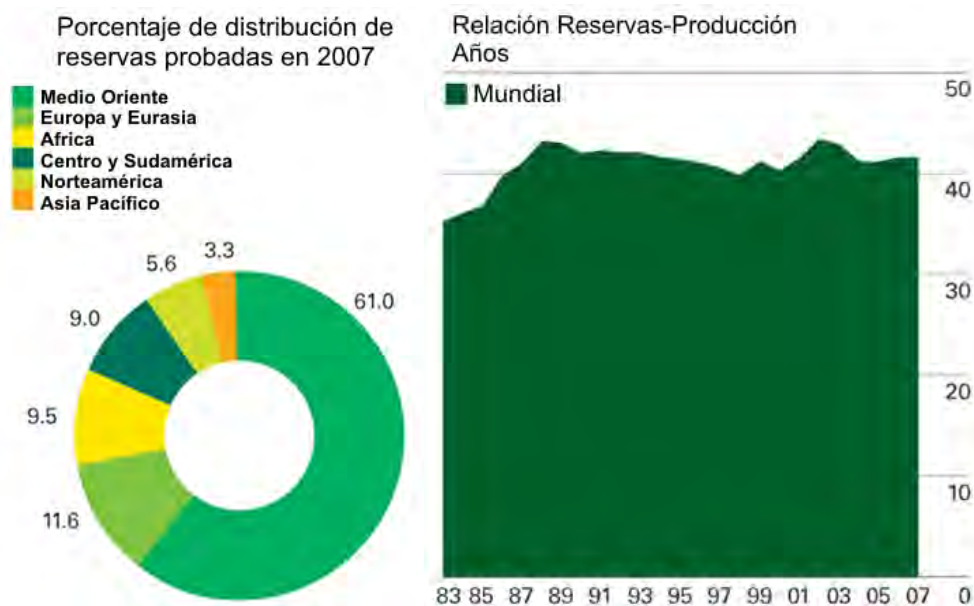
²⁵ INVENTARIO MUNDIAL DEL PETRÓLEO USGS 2000 (U.S. Geological Survey). Disponible en <http://www.usgs.gov>

²⁶ INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO. IMP. <http://www.imp.mx>

²⁷ Las Reservas de Hidrocarburos de México. Evaluación al 1° de enero de 2008. PEMEX. Exploración y Producción. ISBN: 978-968-5173-14-8

De acuerdo a la publicación del 2008, las reservas probadas mundiales de petróleo, son de 168,600 millones de toneladas, equivalentes a 1 billón 237,900 millones de barriles. La mayor parte de dichas reservas se ubican en Medio Oriente con el 61%, seguido del 11.6% en Europa y Eurasia; en el continente americano se encuentra el 14.6% del total (figura 2.4). La producción mundial de petróleo es de 81 millones 533 mil barriles diarios. De acuerdo a la relación reservas-producción y sin considerar descubrimientos de nuevos yacimientos el petróleo duraría alrededor de 42 años²⁸ como se muestra en la figura 2.4.

Figura 2.4 Reservas Mundiales de petróleo. Tiempo estimado de duración



Fuente: BP Statistical Review of World Energy. Junio 2008

Hay que tener en cuenta que solo se estiman las reservas probadas y que se debe considerar el petróleo que no ha sido descubierto por lo que su duración podría ser mayor, sin embargo no hay que olvidar que es un recurso no renovable y algún día tendrá que agotarse.

La producción de un pozo, un campo o un país puede expresarse en una curva, que muestra el comportamiento de la producción en el tiempo.

La teoría del pico del petróleo o pico de Hubbert, es una teoría acerca de la tasa de agotamiento a largo plazo del petróleo, así como de otros combustibles fósiles. De acuerdo a la teoría, el pico del petróleo, es el punto en que, agotada la mitad de la dotación geológica, se inicia la etapa de la declinación, a partir de la cual la extracción empezará a reducirse rápidamente²⁹.

Según la teoría, la extracción de un pozo cualquiera sigue una curva con un máximo, punto de producción. Llegados a ese punto cada barril de petróleo se hace cada vez más caro de

²⁸ BP STATICS REVIEW OF WORLD ENERGY. Junio 2008. Disponible en <http://www.bp.com>

²⁹ BARBOSA Fabio, DOMINGUEZ Nicolas. Situación de las reservas y el potencial petrolero de México. Economía UNAM [en línea] Vol.3 No.7. Enero 2006. Disponible en: <http://www.ejournal.unam.mx/ecu/ecunam7/ecunam0705.pdf> ISSN: 1665-952X

extraer hasta que la producción deja de ser rentable al ser necesario gastar más cantidad de crudo que el que se obtiene de extraerlo; si la curva de producción de un pozo sigue esa función, la curva de producción de países enteros y en consecuencia, la curva mundial seguirían patrones similares.

Para el caso de México, Petróleos Mexicanos (PEMEX) elabora cada año una evaluación de las reservas de hidrocarburos. La evaluación se realiza de acuerdo con definiciones internacionales emitidas por: Society of Petroleum Engineers (SPE), World Petroleum Council (WPC) y Securities Exchange Commission (SEC).

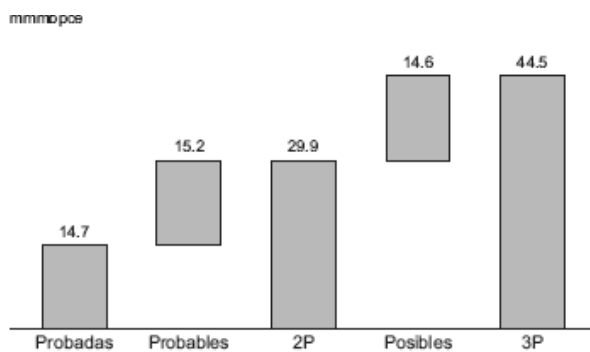
El volumen original de hidrocarburos se define como la cantidad que se estima existe inicialmente en un yacimiento, puede ser estimado por procedimientos deterministas o probabilistas. Se llama recurso únicamente a la parte recuperable de esas cantidades, y las reservas constituye una parte de los recursos, son acumulaciones conocidas, recuperables y comercialmente explotables³⁰.

Se presentan tres categorías de reservas: probadas, probables y posibles. Las reservas probadas son las cantidades estimadas de hidrocarburos, las cuales mediante datos geológicos y de ingeniería demuestran, con certidumbre, que serán recuperadas en años futuros, de reservas conocidas bajo condiciones económicas y operativas existentes.

Las reservas probables y posibles se consideran para integrar la reserva total, también llamada reserva 3P. Las reservas probables son aquellas donde el análisis de la información geológica y de ingeniería de los yacimientos en estudio sugiere que son más factibles de ser comercialmente recuperables, que de no serlo. Si se emplean métodos probabilistas para su evaluación, habrá una probabilidad de al menos 50% de que las cantidades a recuperar sean iguales o mayores que la suma de las reservas probadas más probables, también llamada reserva 2P.

Las reservas posibles son aquellos volúmenes de hidrocarburos cuya información geológica y

Figura 2.5 Integración por categoría de las reservas de petróleo crudo equivalente del país. Miles de millones de barriles de petróleo crudo equivalente mmmbpce



Fuente: Las Reservas de Hidrocarburos de México. Evaluación al 1° de enero de 2008. PEMEX Exploración y Producción

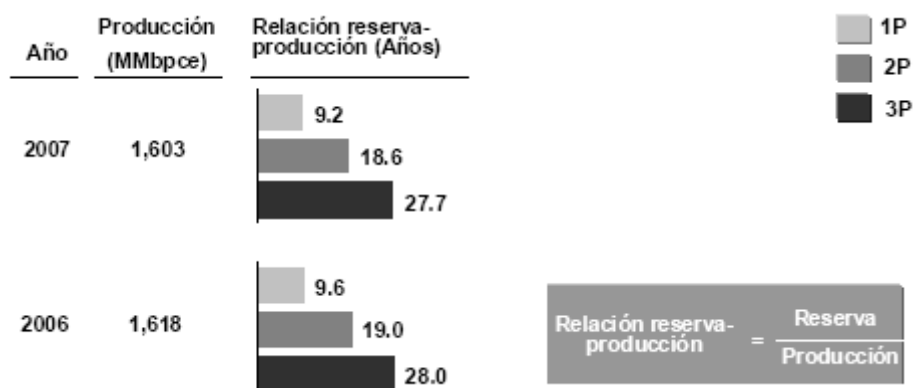
de ingeniería sugiere que es menos segura su recuperación que las reservas probables. Tendrá al menos una probabilidad de 10% de que las cantidades a recuperar sean iguales o mayores a la suma de las reservas probadas, probables y posibles o reserva 3P.

Las reservas 3P que corresponden a la adición de las reservas probadas, probables y posibles eran, para el primero de enero de 2008 de 44,482.7 millones de barriles de petróleo. El 33.1% por ciento corresponde a las reservas probadas, el 34 por ciento a las probables y el 32.9% a las posibles. (Figura 2.5).

³⁰ Las Reservas de Hidrocarburos de México. Evaluación al 1° de enero de 2008. PEMEX Exploración y Producción.
ISBN: 978-968-5173-14-8

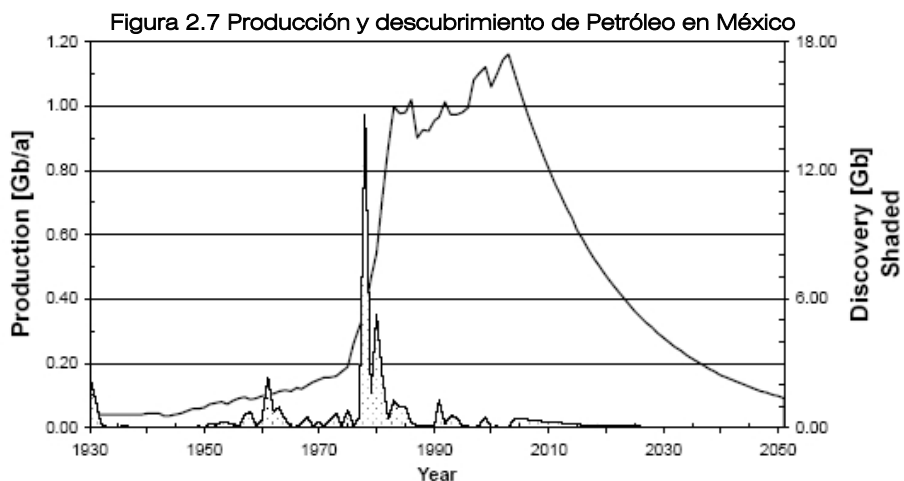
La relación reserva-producción, es decir, el cociente que resulta de dividir la reserva entre la producción, al 31 de diciembre de 2007, es de 27.7 años para la reserva 3P, 18.6 años para la reserva 2P y 9.2 años para la reserva probada³¹(Figura 2.6). Estos datos son similares a los que da la revisión estadística de BP para finales de 2007, de 9.6 años para las reservas probadas.

Figura 2.6 Relación reserva-producción



Fuente: Las Reservas de Hidrocarburos de México. Evaluación al 1° de enero de 2008. PEMEX Exploración y Producción

De acuerdo a reportes de la Asociación para estudios del pico del petróleo y gas (The Association for the Study of Peak Oil and Gas ASPO), se espera que en México suceda en el 2015 y que la producción caiga en el 2050 a 400,000 barriles diarios (figura 2.7).



Fuente: Esquema de producción, reservas y volumen de descubrimientos, según ASPO (Boletín 35. Nov. 2003) Colin Campbell

Si se descubren nuevos yacimientos las reservas de hidrocarburos podrían incrementarse. No obstante, hay que recordar que el petróleo es un recurso no renovable y es evidente que se agotará en algún momento, es por eso que se realizan estudios para estimar cuándo ocurrirá el pico del petróleo y así poder tomar medidas al respecto. Una solución es incrementar la eficiencia en el uso de combustibles y buscar fuentes de energía alterna como la solar.

³¹ Las Reservas de Hidrocarburos de México. Evaluación al 1° de enero de 2008. PEMEX Exploración y Producción.
ISBN: 978-968-5173-14-8

2.4 ENERGÍAS ALTERNAS

Como se ha mencionado con anterioridad, una alternativa al problema de la generación de energía es el uso de las energías renovables, las cuales provocan un menor impacto ambiental. Se conocen como energías alternas o renovables a aquellas que están asociadas a los ciclos naturales, como la energía hidráulica en menor escala, la energía eólica, la energía geotérmica, la energía maremotriz, las celdas de combustible, la biomasa, la energía solar térmica y la energía solar fotovoltaica, principalmente. A continuación se mencionan las características principales de dichas energías.

Las hidroeléctricas requieren de una gran infraestructura para funcionar, sin embargo puede obtenerse electricidad para abastecer menores demandas utilizando las corrientes naturales, aprovechando los desniveles del terreno, sin necesidad de desviar o almacenar grandes cantidades de agua. Esto se hace en centrales minihidráulicas que generan menos de 5 Mega Watts (MW), ayudan a reducir las tarifas eléctricas, evitan la generación de gases de efecto invernadero, propician el desarrollo económico y generan empleos.

La energía cinética del viento puede convertirse en energía mecánica rotacional y esta a su vez en energía eléctrica por medio de aerogeneradores que están formados por un arreglo de aspas, un generador y una torre. Existen grandes aerogeneradores agrupados en granjas eólicas donde la fuerza del viento es lo más permanente y constante posible.

La energía geotérmica consiste en el calor que proviene del interior de la tierra, que calienta los cuerpos de agua subterráneos generando vapor, que es aprovechado para mover turbinas y así generar electricidad, es un tipo de planta termoeléctrica que no utiliza combustibles fósiles para producir vapor.

La energía maremotriz se basa en los desniveles de varios metros entre las alturas de las mareas; por lo tanto el avance y el retroceso de las aguas implican el desplazamiento de enormes masas de agua que puede ser aprovechada para mover generadores que transformen la energía cinética en energía eléctrica, sin embargo, esta tecnología aún se encuentra en proceso de desarrollo.

La celda de combustible opera como una batería, genera electricidad combinando hidrógeno y oxígeno electroquímicamente, sin ninguna combustión, produciendo corriente eléctrica, agua y calor útil, mientras se le provea de combustible. A diferencia de las baterías, la celda de combustible no se agota ni requiere recarga.

Existen varias ciudades que están probando y utilizando dicha tecnología en prototipos de autobuses. La Unión Europea (UE) se ha propuesto que para 2015 circulen por territorio comunitario un 2% de vehículos con hidrógeno. Las pilas de combustible de hidrógeno generan una corriente eléctrica que alimenta el motor gracias a una reacción química entre el hidrógeno y el aire³².

La biomasa es la masa total de la materia viva de una parte de un organismo, población o ecosistema. Se aprovecha a partir de la combustión directa para generar energía, también se utiliza como materia prima para fabricar biocombustibles mediante procesos de fermentación alcohólica (bioetanol), transformación de ácidos grasos (biodiesel) y descomposición anaeróbica de desechos (biogas). Su clasificación como energía renovable genera debate ya que aunque se cultiven las plantas que las producen, para que el recurso sea constante, su uso

³² CONAE. Comisión Nacional para el Ahorro de Energía. <http://www.conae.gob.mx>

provoca emisiones de CO₂ y es cuestionable el uso del suelo para cultivos destinados a producir combustible en lugar de producir alimentos. Lo más conveniente sería aprovechar solo los residuos de los cultivos y el uso de rellenos sanitarios para producir gas metano.

Finalmente se encuentra la energía solar, generalmente se divide en energía solar térmica y energía solar fotovoltaica. La energía solar térmica consiste en la transformación de la radiación solar en calor, que puede usarse para calentar agua para uso residencial o para generar vapor para mover turbinas y generar electricidad. La radiación se transforma en calor por medio de colectores solares.

La energía solar fotovoltaica convierte la energía luminosa del Sol en electricidad de una forma directa e inmediata por medio de celdas fotovoltaicas, las celdas están hechas de materiales semiconductores, principalmente de silicio, basados en el efecto fotoeléctrico que considera la luz como partículas cargadas de energía llamadas fotones, que al chocar con los electrones de dichos materiales, si tienen suficiente energía, los desprenden, generando una corriente eléctrica.

En el caso de la energía solar utilizada en los sistemas fotovoltaicos y de la eólica en los aerogeneradores, es importante tener en cuenta el almacenamiento de la electricidad ya que una característica de dichos sistemas es que su producción no es constante ni se relaciona con las necesidades de consumo, por lo tanto, cuando la demanda es escasa, se puede almacenar energía mediante la carga de baterías, para poder suministrar electricidad cuando la generación sea mínima o nula.

Esta investigación se enfoca en el estudio de la energía solar para generar electricidad, proponiéndola como una fuente de energía renovable y limpia que puede ayudar a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y ahorrar energía en las viviendas en áreas urbanas.

2.5 ENERGÍA SOLAR

Para poder entender el funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos para generar electricidad, primero hay que conocer los conceptos básicos sobre energía solar.

El Sol se compone principalmente de hidrógeno y helio, en su núcleo se realizan reacciones nucleares de fusión en donde el hidrógeno se transforma en helio generando energía que llega a la tierra en forma de cuantos de energía llamados fotones.

El Sol emite radiación en toda la gama del espectro electromagnético, para el aprovechamiento de su energía solo es importante la radiación térmica que incluye los rayos ultravioleta, la radiación visible y la infrarroja. El flujo luminoso, que es un flujo de energía, tiene unidades de energía por unidad de área y por unidad de tiempo: watts-hora / metro² (Wh/m²).

Sobre la atmósfera terrestre incide una cantidad de radiación solar casi ininterrumpida, lo que da lugar a la constante solar. La constante solar se denomina como G_{sc}, es el flujo de energía proveniente del Sol que incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, ubicada a la distancia media de la Tierra al Sol, fuera de toda atmósfera. La constante solar se refiere a una cantidad de energía que incide, instantáneamente sobre una superficie de área unitaria. Cuando se tiene una superficie en posición oblicua respecto de

la dirección del Sol, recibirá un menor flujo de energía que cuando es perpendicular³³. Se mide en unidades de energía, siendo las más usuales:

Mega-joule / metro² (MJ/m²)

Kilo-watt hora / metro² (KWh/m²) 1 KWh/m² = 3.6 MJ/m²

El valor comúnmente aceptado para la constante solar es de: $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$

La masa de aire "M" es la distancia entre la altura del sol respecto al horizonte y un punto fijo sobre la Tierra. Cuando el sol alcanza el cenit la distancia es mínima, ya que los rayos solares inciden en un ángulo de 90°, en esta posición se considera una masa de aire igual a 1 "M1". Cuando el sol está más cercano al horizonte la masa de aire aumenta y la distancia que deben atravesar los rayos solares para llegar a un punto determinado se incrementa.

El espectro solar correspondiente a una masa de aire de 1.5 es el valor que se toma como estándar, con una intensidad de 1000 W/m², que es la energía que alcanza la superficie terrestre por el efecto de reflexión, difusión y absorción del polvo, nubes, vapor de agua, bióxido de carbono y otros gases.

La radiación extraterrestre que recibe la tierra es variable debido a que la órbita de la Tierra alrededor del Sol es casi elíptica, por lo que varía dependiendo del día del año. La radiación solar que incide sobre una superficie de la Tierra se clasifica dependiendo de su origen en directa, difusa y terrestre o de albedo.

La radiación directa es la que se recibe del Sol sin sufrir ninguna dispersión atmosférica, por lo tanto la radiación extraterrestre es radiación directa, que se representa generalmente con el subíndice "b".

La radiación difusa es la que se recibe del Sol después de ser dispersada por la atmósfera. Es la que se recibe a través de las nubes, es originada por los efectos de dispersión. Para denominar a la radiación difusa se utiliza el subíndice "d".

Por último se encuentra la radiación terrestre o de albedo, es aquella que es reflejada por objetos terrestres, principalmente del suelo. Se representa con el subíndice "r".

La irradiación global es la suma de las radiaciones directa, difusa y terrestre que se reciben sobre una superficie. Para obtener la irradiación global hay que tener en cuenta las condiciones atmosféricas y la refracción del terreno del área de estudio.

La potencia solar se expresa por medio de la irradiancia que indica la energía que incide instantáneamente sobre una superficie por unidad de área, se mide en W/m². La cantidad de energía por unidad de área que incide durante un período de tiempo, recibe el nombre de irradiación, se mide en Wh/m² equivalente a 3600 J/m², la irradiación es la suma de la irradiancia durante un periodo de tiempo determinado³⁴.

³³ HERMOSILLO VILLALOBOS, Juan Jorge. "Notas sobre el curso de Energía Solar". Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Occidente (ITESO). Jalisco 1995

³⁴ CASTAÑAR MUÑOZ, Luis. "Energía Solar Fotovoltaica" Ediciones UPC. Universitat Politècnica de Catalunya. 1994

El flujo de energía sobre una superficie determinada depende de la irradiancia que exista y de la orientación de dicha superficie respecto de la dirección de propagación de los rayos solares. La intensidad de radiación sobre una superficie depende del ángulo que forma la perpendicular de la superficie, respecto de la dirección de propagación de la radiación. Este ángulo se conoce como ángulo de incidencia, que se representa con el símbolo " θ "³⁵. La irradiancia incidente sobre dicha superficie es igual a la siguiente expresión:

$$GT = G_n \cos \theta$$

En donde:

GT = Irradiancia sobre un plano con cualquier inclinación

G_n = Irradiancia media sobre un plano perpendicular a la dirección de propagación de la radiación.

Si se conoce la irradiancia perpendicular sobre una superficie y el ángulo " θ ", se puede calcular la irradiancia sobre un plano con cualquier inclinación. Debido a que el Sol describe un movimiento aparente a lo largo del día y otro a lo largo del año, el valor del ángulo " θ " varía con la fecha y hora, además de hacerlo con la orientación del plano, su inclinación respecto de la horizontal y la latitud geográfica del lugar en donde se ubica la superficie.

Para el caso de los paneles solares la mayor cantidad de energía que puede ser recibida es cuando el ángulo de incidencia " θ " es igual a cero, sin embargo no es posible obtener este valor durante todo el año con una superficie estática. Lo más conveniente es que la inclinación de la superficie sea igual a la latitud del lugar más 15° para el invierno y menos 15° para el verano, es importante mencionar que debe hacerse un estudio de la irradiación que será recibida para así poder elegir la inclinación más favorable.

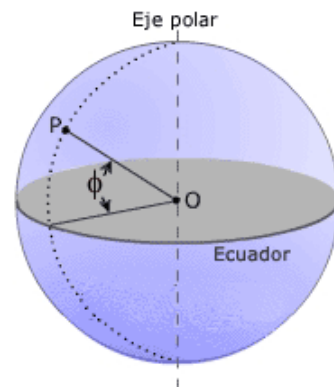
Existen tablas y mapas de radiación global directa y difusa para poder conocer los valores de una localidad determinada, basados en la observación durante largos períodos de tiempo. La nomenclatura y los datos más utilizados para el cálculo son los siguientes:

ϕ Symboliza la latitud geográfica, es la distancia angular entre el ecuador y cualquier punto del planeta (figura 2.8), el valor es positivo en el hemisferio norte y negativo para el hemisferio sur $90^\circ < \phi < 90^\circ$. El valor de la latitud para la Ciudad de México de acuerdo al observatorio de Tacubaya es de 19°24'13".

δ Declinación solar es el ángulo que forma el sol respecto al ecuador, (figura 2.9) la declinación solar es cero en los equinoccios, es máxima en el solsticio de verano (23°27') y mínima en el solsticio de invierno (-23°27'). La declinación se calcula con la ecuación de Cooper:

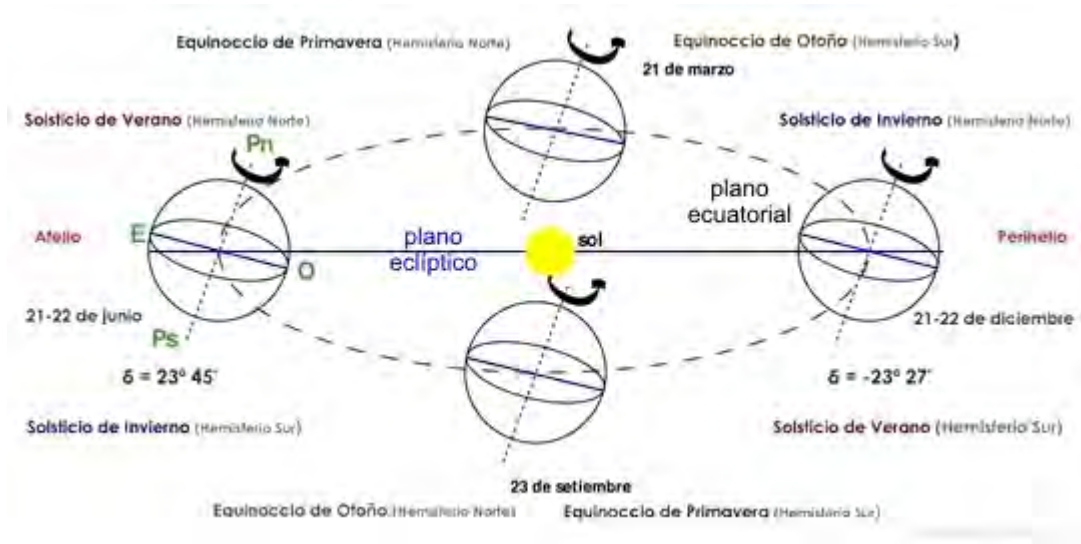
$$\delta = 23.45 \text{ sen } \left(360 \frac{284+n}{365} \right)$$

Figura 2.8 Latitud Geográfica



³⁵ HERMOSILLO VILLALOBOS, Juan Jorge. "Notas sobre el curso de Energía Solar". Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Occidente (ITESO). Jalisco 1995

Figura 2.9 Declinación Solar



Fuente: Absoluter ProtecSol ©

Donde n es igual al día juliano que puede calcularse con los datos de la Tabla 2.3:

Tabla 2.3 Cálculo del día juliano

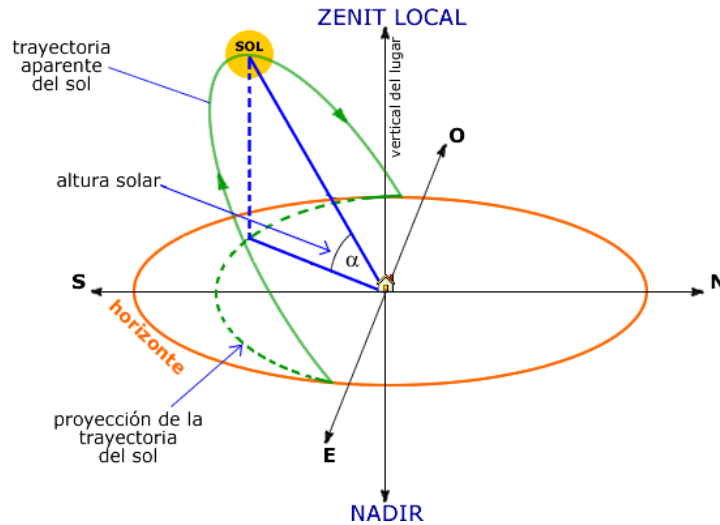
Mes	"n" para el i-ésimo día del mes	Mes	"n" para el i-ésimo día del mes
Enero	i	Julio	$181+i$
Febrero	$31+i$	Agosto	$212+i$
Marzo	$59+i$	Septiembre	$243+i$
Abril	$90+i$	Octubre	$273+i$
Mayo	$120+i$	Noviembre	$304+i$
Junio	$151+i$	Diciembre	$334+i$

Fuente: Curso de energía Solar (ITESO)

α La altura solar, también llamada elevación solar, es la altura angular del Sol sobre el horizonte celestial del observador (figura 2.10). Comienza en 0° al amanecer y culmina al mediodía con el valor de 90° . Para calcular la altura se utiliza la siguiente expresión:

$$\alpha = \arcsin(\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta)$$

Figura 2.10 Altura Solar

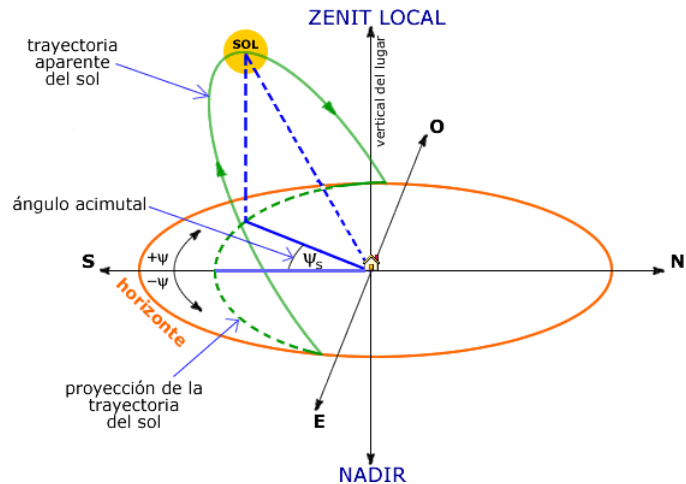


Fuente: Cursolar. Universidad de Jaen

γ Acimut. Es el ángulo formado por la proyección del Sol sobre el plano del horizonte con la dirección Sur (figura 2.11). Hacia el Este se consideran valores negativos de 0° a 180° y hacia el Oeste valores positivos de 0° a 180° . El acimut se calcula con la fórmula:

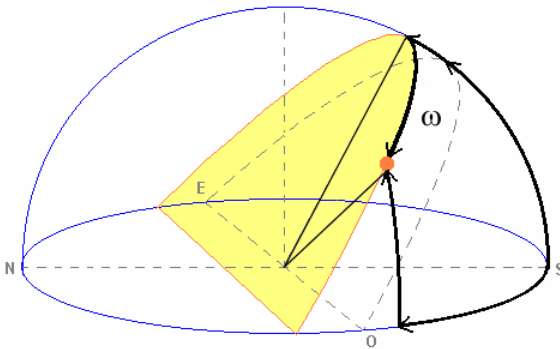
$$\gamma = \text{arc sen} \left(\frac{\cos \delta * \text{sen } \omega}{\cos \alpha} \right)$$

Figura 2.11 Acimut



Fuente: Cursolar. Universidad de Jaen

Figura 2.12 Angulo Horario



ω Angulo horario, es el desplazamiento angular del Sol, al Este o al Oeste del meridiano local (figura 2.12), debido a la rotación de la Tierra a la velocidad de 15° por hora, es negativo en la mañana y positivo en la tarde. A las 12 del día el ángulo es igual a 0. La hora de la puesta del sol se calcula con:

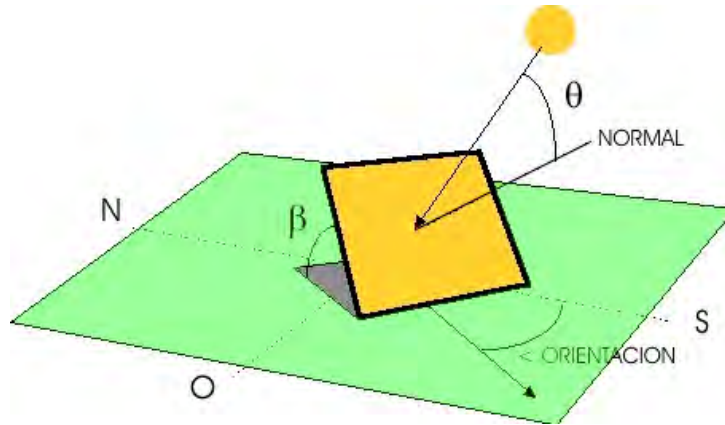
$$\cos \omega = - \tan \varphi \cdot \tan \delta$$

β Se utiliza para denominar a la pendiente del plano sobre el cual incide la radiación (figura 10), por ejemplo para una cubierta horizontal el valor de $\beta = 0^\circ$ y en un muro $\beta = 90^\circ$

θ Angulo de incidencia de la radiación. Es el ángulo que forma la perpendicular de la superficie que recibe los rayos solares respecto de la propagación de la radiación (figura 2.13), se obtiene con la siguiente expresión:

$$\theta = \arccos (\text{sen} \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \text{sen} \beta \cdot \cos (\gamma - \text{ángulo de orientación de la superficie}))$$

Figura 2.13 Angulo de incidencia y pendiente del plano



Tomando como ejemplo a la Ciudad de México, con una latitud de $19^\circ 24' 13''$ (19.40) de acuerdo al observatorio de Tacubaya, se puede calcular la declinación, la altura solar, el acimut y al ángulo de la puesta de sol para un día y hora determinados. En este caso se hará el cálculo para los días que determinan los cambios de estación, los equinoccios y los solsticios, a las doce del día, es decir el 20 de marzo y el 22 de septiembre para los equinoccios, el 21 de junio y el 21 de diciembre para los solsticios. Los resultados se muestran en las tablas 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7.

Tabla 2.4. Coordenadas solares para el equinoccio de primavera en el hemisferio norte

EQUINOCCIO DE PRIMAVERA	20 de Marzo 12:00 p.m.
Declinación $\delta = 23.45 \text{ sen} \left(360 \cdot \frac{284+n}{365} \right)$	$\delta = 23.45 \text{ sen} \left(360 \cdot \frac{284+79}{365} \right)$ $\delta = -0.81 = 0^\circ 48' 36''$
Altura Solar $\alpha = \arcsin(\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \text{sen} \varphi \cdot \text{sen} \delta)$	$\alpha = \arcsin(\cos 19.4 \cdot \cos -0.81 \cdot \cos 0 + \text{sen} 19.4 \cdot \text{sen} -0.81)$ $\alpha = 69.79^\circ = 69^\circ 47' 24''$
Acimut $\gamma = \arcsin \left(\frac{\cos \delta \cdot \text{sen} \omega}{\cos \alpha} \right)$	$\gamma = \arcsin \left(\frac{\cos -0.81 \cdot \text{sen} 0}{\cos 69.79} \right)$ $\gamma = 0$
Angulo de la puesta del sol $\cos \omega = -\tan \varphi \cdot \tan \delta$	$\cos \omega = -\tan 19.40 \cdot \tan -0.81$ $\omega = 89.71 = 89^\circ 42' 49''$

Fuente: Elaboración propia a partir de las fórmulas presentadas

Tabla 2.5 Coordenadas solares para el solsticio de verano en el hemisferio norte

SOLSTICIO DE VERANO	21 de Junio 12:00 p.m.
Declinación $\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right)$	$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 \cdot \frac{284 - 172}{365} \right)$ $\delta = 23.45^\circ = 23^\circ 27''$
Altura Solar $\alpha = \operatorname{arc} \operatorname{sen}(\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \operatorname{sen} \varphi \cdot \operatorname{sen} \delta)$	$\alpha = \operatorname{arc} \operatorname{sen}(\cos 19.4 \cdot \cos 23.45 \cdot \cos 0 + \operatorname{sen} 19.4 \cdot \operatorname{sen} 23.45)$ $\alpha = 85.95^\circ = 85^\circ 57'$
Acimut $\gamma = \operatorname{arc} \operatorname{sen} \left(\frac{\cos \delta \cdot \operatorname{sen} \omega}{\cos \alpha} \right)$	$\gamma = \operatorname{arc} \operatorname{sen} \left(\frac{\cos 23.45 \cdot \operatorname{sen} 0}{\cos 85.95} \right)$ $\gamma = 0$
Angulo de la puesta del sol $\cos \omega = -\tan \varphi \cdot \tan \delta$	$\cos \omega = -\tan 19.40 \cdot \tan 23.45$ $\omega = 98.78^\circ = 98^\circ 47'$

Fuente: Elaboración propia a partir de las fórmulas presentadas

Tabla 2.6 Coordenadas solares para el equinoccio de otoño en el hemisferio norte

EQUINOCCIO DE OTOÑO	22 de Septiembre 12:00 p.m.
Declinación $\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right)$	$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 \cdot \frac{284 - 265}{365} \right)$ $\delta = -0.61^\circ = 0^\circ 36' 36''$
Altura Solar $\alpha = \operatorname{arc} \operatorname{sen}(\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \operatorname{sen} \varphi \cdot \operatorname{sen} \delta)$	$\alpha = \operatorname{arc} \operatorname{sen}(\cos 19.4 \cdot \cos -0.61 \cdot \cos 0 + \operatorname{sen} 19.4 \cdot \operatorname{sen} -0.61)$ $\alpha = 69.99^\circ = 69^\circ 59' 24''$
Acimut $\gamma = \operatorname{arc} \operatorname{sen} \left(\frac{\cos \delta \cdot \operatorname{sen} \omega}{\cos \alpha} \right)$	$\gamma = \operatorname{arc} \operatorname{sen} \left(\frac{\cos -0.61 \cdot \operatorname{sen} 0}{\cos 69.99} \right)$ $\gamma = 0$
Angulo de la puesta del sol $\cos \omega = -\tan \varphi \cdot \tan \delta$	$\cos \omega = -\tan 19.40 \cdot \tan -0.61$ $\omega = 89.79^\circ = 89^\circ 47' 24''$

Fuente: Elaboración propia a partir de las fórmulas presentadas

Tabla 2.7 Coordenadas solares para el solsticio de invierno en el hemisferio norte

SOLSTICIO DE INVIERNO	21 de Diciembre 12:00 p.m.
Declinación $\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right)$	$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 \cdot \frac{284 + 355}{365} \right)$ $\delta = -23.45^\circ = 23^\circ 27'$
Altura Solar $\alpha = \operatorname{arc} \operatorname{sen}(\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \operatorname{sen} \varphi \cdot \operatorname{sen} \delta)$	$\alpha = \operatorname{arc} \operatorname{sen}(\cos 19.4 \cdot \cos -23.45 \cdot \cos 0 + \operatorname{sen} 19.4 \cdot \operatorname{sen} -23.45)$ $\alpha = 47.15^\circ = 47^\circ 9'$
Acimut $\gamma = \operatorname{arc} \operatorname{sen} \left(\frac{\cos \delta \cdot \operatorname{sen} \omega}{\cos \alpha} \right)$	$\gamma = \operatorname{arc} \operatorname{sen} \left(\frac{\cos -23.45 \cdot \operatorname{sen} 0}{\cos 47.15} \right)$ $\gamma = 0$
Angulo de la puesta del sol $\cos \omega = -\tan \varphi \cdot \tan \delta$	$\cos \omega = -\tan 19.40 \cdot \tan -23.45$ $\omega = 81.21^\circ = 81^\circ 12'59''$

Fuente: Elaboración propia a partir de las fórmulas presentadas

Como puede verse en los cuatro casos, el Acimut para las 12 del día es 0, ya que la posición del sol coincide con la orientación sur. En el caso de los solsticios la declinación es de $23^\circ 27'$, que es el máximo valor que puede alcanzar debido a la inclinación del eje terrestre y es casi de 0 en los equinoccios.

Continuando con el ejemplo de la Ciudad de México y considerando la irradiancia de 1000 W/m² que alcanza la superficie después de ser dispersada, puede hacerse el ejercicio para conocer el ángulo de incidencia y el valor de la irradiancia en superficies inclinadas utilizando la expresión para la irradiancia en un plano con cualquier inclinación. Los valores se obtendrán para las inclinaciones más óptimas: la que corresponde a la latitud del lugar de 19.40° en verano e invierno, la de la latitud del lugar más 15° (34.40°) para invierno y la latitud del lugar menos 15° (4.40°) para el verano. La superficie se considera orientada al sur, por lo que la diferencia del ángulo del acimut y la orientación es 0, por lo tanto primero hay que obtener el ángulo de incidencia como se ve en la tabla 2.8.

$$\theta = \operatorname{arc} \cos (\operatorname{sen} \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \operatorname{sen} \beta \cdot \cos (\gamma - \text{ángulo de orientación de la superficie}))$$

Tabla 2.8 Cálculo del ángulo de incidencia

Verano	Invierno
$\theta = \operatorname{arccos}(\operatorname{sen} 85.95 \cdot \cos 19.40 + \cos 85.95 \cdot \operatorname{sen} 19.40 \cdot \cos 0)$	$\theta = \operatorname{arccos}(\operatorname{sen} 47.15 \cdot \cos 19.40 + \cos 47.15 \cdot \operatorname{sen} 19.40 \cdot \cos 0)$
$\theta = 15.42^\circ = 15^\circ 25'$	$\theta = 23.45^\circ = 23^\circ 27'$
Verano latitud $19.40^\circ - 15^\circ$	Invierno latitud $19.40^\circ + 15^\circ$
$\theta = \operatorname{arccos}(\operatorname{sen} 85.95 \cdot \cos 4.40 + \cos 85.95 \cdot \operatorname{sen} 4.40 \cdot \cos 0)$	$\theta = \operatorname{arccos}(\operatorname{sen} 47.15 \cdot \cos 34.40 + \cos 47.15 \cdot \operatorname{sen} 34.40 \cdot \cos 0)$
$\theta = 0.81^\circ = 0^\circ 48'$	$\theta = 8.47^\circ = 8^\circ 28'$

Fuente: Elaboración propia a partir de las fórmulas presentadas

Puede verse que para los valores de más y menos 15° respecto de la latitud, el ángulo de incidencia es casi 0° en verano y en invierno aproximadamente 9°, lo que indica que la irradiación con esta inclinación será cercana al 100 por ciento; los valores obtenidos con el cálculo pueden verse en la tabla 2.9.

Tabla 2.9 Cálculo de la irradiancia sobre un plano inclinado

IRRADIANCIA SOBRE SUPERFICIES CON DIFERENTE INCLINACIÓN		
INCLINACIÓN DE LA SUPERFICIE IGUAL A LA LATITUD (19.4°)	INCLINACIÓN DE LA SUPERFICIE IGUAL A LA LATITUD 19.4°+15°	INCLINACIÓN DE LA SUPERFICIE IGUAL A LA LATITUD 19.4°-15°
$GT = G_n \cos \theta$ En verano: $GT = 1000 \text{ W/m}^2 \cdot \cos (15.42)$ $GT = 964 \text{ W/m}^2$ (96%) En invierno: $GT = 1000 \text{ W/m}^2 \cdot \cos (23.45)$ $GT = 917.41 \text{ W/m}^2$ (91%)	$GT = G_n \cos \theta$ En invierno: $GT = 1000 \text{ W/m}^2 \cdot \cos (8.47)$ $GT = 989.09 \text{ W/m}^2$ (98%)	$GT = G_n \cos \theta$ En verano: $GT = 1000 \text{ W/m}^2 \cdot \cos (0.81)$ $GT = 999.90 \text{ W/m}^2$ (99%)

Fuente: Elaboración propia a partir de las fórmulas presentadas

De acuerdo a los resultados obtenidos, el caso más desfavorable es en invierno con una inclinación de la superficie igual a la latitud del lugar, sin embargo se obtiene un 91% de la radiación total. Se observa que la pérdida de radiación solar es casi nula en verano con la inclinación de la latitud -15°. Debe de tomarse en cuenta también la nubosidad del lugar y los datos registrados de la radiación global.

Además del cálculo teórico de la radiación solar, existen varios métodos para medir la radiación, ya sea irradiancia o irradiación. Generalmente se utiliza un piranómetro que mide la irradiación global en un plano horizontal.

Como se menciona anteriormente los datos de la irradiación pueden obtenerse de estaciones meteorológicas. Sin embargo es posible hacer el cálculo, existen una serie de fórmulas que pueden encontrarse en los diferentes textos sobre la energía solar, si se requiere realizar un estudio más extenso, ya que deben calcularse la irradiación por cada hora del día para poder obtener el valor de un día, y hacer lo mismo con todos los días del mes para conseguir el valor mensual.

Como arquitectos, para el cálculo de una instalación fotovoltaica puede no hacerse el cálculo de la irradiación si se tienen los datos registrados de la irradiación directa, difusa y reflejada para los diferentes meses del año, que sumadas dan la irradiación global y así realizar el cálculo para dimensionar un sistema fotovoltaico.

3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Los sistemas fotovoltaicos utilizan celdas solares para generar energía eléctrica, dicha energía puede ser utilizada en las viviendas. Después de conocer como se produce la energía en el Sol y los principales conceptos sobre energía solar, es conveniente conocer los conceptos eléctricos que se utilizan en el diseño de un sistema fotovoltaico.

3.1 CONCEPTOS ELÉCTRICOS

Electricidad

La electricidad es un fenómeno físico que se debe a las cargas eléctricas y a la interacción entre estas, se manifiesta principalmente en fenómenos mecánicos, térmicos, luminosos y químicos. Las cargas eléctricas son de dos tipos, positivas y negativas, todos los cuerpos en la naturaleza son eléctricamente neutros, por lo que si hay cargas negativas, éstas son equilibradas por cargas positivas.

Corriente eléctrica

Cuando los electrones se mueven a través de un material se produce una corriente eléctrica que circula por él, es un fenómeno físico originado por cargas eléctricas estáticas o en movimiento. La corriente eléctrica se representa con la letra "I", es el número de electrones que, en un segundo, fluyen a través de una sección transversal de área de dicho material. La corriente eléctrica se mide en Amperios, que se representan con la letra "A"³⁶.

Existen dos tipos de corriente eléctrica, la corriente continua o directa y la corriente alterna. La corriente continua "CC" ó "DC", por su abreviación en inglés, tiene una dirección permanente, es un flujo de carga eléctrica que no cambia de sentido con el tiempo. La corriente alterna "CA" ó "AC", por sus siglas en inglés, cambia la dirección de la corriente temporal y periódicamente, es la corriente utilizada para suministrar energía eléctrica en las viviendas y la industria, la corriente alterna de uso doméstico cambia su polaridad 60 veces por segundo, esto se conoce como frecuencia de la corriente alterna.

Resistencia

La resistencia eléctrica de un material, representada por la letra "R", es la oposición que encuentra la corriente eléctrica para recorrerla. Se mide en ohms, se designa con la letra griega omega mayúscula (Ω). Dentro de los materiales, los metales ofrecen muy poca resistencia y los aislantes oponen mucha resistencia al flujo de electrones³⁷.

Voltaje

El voltaje eléctrico es el trabajo que debe realizar una fuente de fuerza electromotriz sobre los electrones para que éstos puedan fluir por el conductor y producir una corriente eléctrica. Se mide en Volts y se representa con la letra "V"³⁸.

³⁶ FOWLER, Richard J. "Electricidad, principios y aplicaciones". España. Editorial Reverte 1994.

³⁷ Idem

³⁸ SÁNCHEZ JUÁREZ, Aarón. Tecnologías Fotovoltaicas. Estado Actual y Futuro Solar. Departamento de Materiales Solares. CIE UNAM, Edición 2007

Potencia

La energía eléctrica se mide en watts por hora, el watt, representado por la letra “W”, es una unidad de potencia, que es la cantidad de trabajo realizado por una corriente eléctrica en un periodo de tiempo, equivale a un joule por segundo. La potencia eléctrica es el producto del voltaje con la corriente³⁹. Por lo tanto:

$$1\text{Watt} = 1\text{ Volt} \times 1\text{ Amper.}$$

Un kilo watt hora es igual a 3.6 mega-joules y equivale a un foco de 100 watts encendido durante 10 horas ó 10 focos de 100watts encendidos durante una hora

En los campos de generación y consumo de electricidades se utilizan los Mega watts (MW- millones de watts); Giga watts (GW- miles de millones de watts) y los Tera watts (TW- billones de watts).

Conductores, aislantes y semiconductores

La conductividad eléctrica es la capacidad de un cuerpo de permitir el paso de la corriente eléctrica a través de sí. También es definida como la propiedad natural característica de cada cuerpo que representa la facilidad con la que los electrones pueden pasar por él.

Dependiendo de la capacidad de conducir la corriente eléctrica, los materiales se clasifican en: conductores, aislantes y semiconductores. Los metales son materiales conductores, algunos materiales aislantes son el vidrio, la madera y el hule. Entre estos dos comportamientos eléctricos se encuentran los semiconductores, estos materiales conducen la electricidad en cierto grado a temperatura ambiente, su capacidad de conducir la electricidad aumenta cuando aumenta la temperatura, sin embargo, cuando disminuye a temperaturas muy bajas, cerca del cero absoluto, se comportan como aislantes. Son utilizados en la industria de la electrónica y microelectrónica ya que presentan un rango amplio de conducción conforme aumenta la temperatura. El silicio, el germanio, el sulfuro de cadmio, y el sulfuro de plomo son semiconductores.

Campo eléctrico

Es aquella región del espacio en donde se dejan sentir los efectos de una carga eléctrica, es decir, fuerzas de atracción y repulsión.

Diodo

Es un dispositivo semiconductor que permite el paso de la corriente eléctrica en una única dirección con características similares a un semiconductor. Las celdas solares se comportan como diodos al unir dos materiales de diferente conductividad eléctrica, las uniones que se utilizan son de semiconductores tipo-n y tipo-p (unión p-n) si son del mismo material se conoce como homounión, cuando son de diferentes materiales se denomina heterounión.

- Un metal y un semiconductor unión tipo M-S
- Un metal, un aislante y un semiconductor unión tipo M-I-S

³⁹ FOWLER, Richard J. “Electricidad, principios y aplicaciones”. España. Editorial Reverte 1994

- Un semiconductor tipo-p, un aislante y un semiconductor tipo-n unión tipo S-I-S⁴⁰.

Circuito eléctrico

Es el camino por donde fluye una corriente eléctrica, sus elementos están conectados para formar un sistema para mover cargas eléctricas a lo largo de trayectorias cerradas. En un circuito en serie las terminales de los dispositivos se conectan secuencialmente. La corriente es la misma en todos los puntos del circuito. Por otra parte un circuito en paralelo es aquel en el que las terminales de entrada de los dispositivos conectados coinciden entre sí al igual que las terminales de salida.

3.2 HISTORIA Y FUNDAMENTOS DE LAS CELDAS SOLARES

La radiación solar que llega a la superficie terrestre puede transformarse directamente en electricidad mediante el uso de celdas fotovoltaicas.

En 1839, el físico francés Alexandre Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico, el efecto fotovoltaico es un fenómeno físico que se presenta en materiales sólidos, líquidos y gaseosos, principalmente en sólidos y semiconductores. Cuando un fotón entra en contacto con un electrón de un material semiconductor, si tiene suficiente energía, lo desprende, produciendo corriente eléctrica, por esta razón los semiconductores son utilizados para la conversión de energía solar en energía eléctrica⁴¹.

La explicación científica para el hecho de que la luz puede ser convertida en electricidad, fue enunciada por Albert Einstein en 1905. Su ensayo sobre la ley del “efecto fotoeléctrico”, estableció las bases de la teoría fotovoltaica moderna. Propuso que la energía de la luz no se expandía continuamente en el espacio sino que consistía en un número finito de cuantos de energía llamados **fotones**, localizados en puntos del espacio, que se mueven sin dividirse y que pueden ser absorbidos o generados solamente como unidades completas. Apuntó que las propiedades de la luz como una onda no contradecían la interpretación corpuscular⁴².

Finalmente, las celdas solares modernas fueron creadas por Calvin Fuller y Gerald Pearson junto con su colega Darryl Chapin, los investigadores presentaron su proyecto “Aparato de Conversión de Energía Solar” de silicio en 1953, demostrando que se puede obtener energía eléctrica a partir de la luz solar mediante un proceso artificial.

En 1958 se utilizaron las primeras celdas solares para generar energía eléctrica en un satélite, el Vanguard I, los primeros avances que se lograron estaban relacionados a la investigación espacial y la fabricación de celdas era muy costosa⁴³. Debido a la crisis energética de 1973 la investigación de celdas solares para aplicaciones terrestres aumentó, generándose un mayor interés por las energías alternas.

Las celdas fotovoltaicas usan la radiación directa, difusa y de albedo para producir electricidad, lo que significa que pueden funcionar en días nublados, aunque en estos días se produzca menor cantidad de electricidad. Por ello es importante conocer el promedio de irradiación solar en la zona en la que se vaya a instalar el sistema. Las zonas más cercanas al ecuador proporcionan mayor energía y conforme se acercan a los polos, la irradiación disminuye.

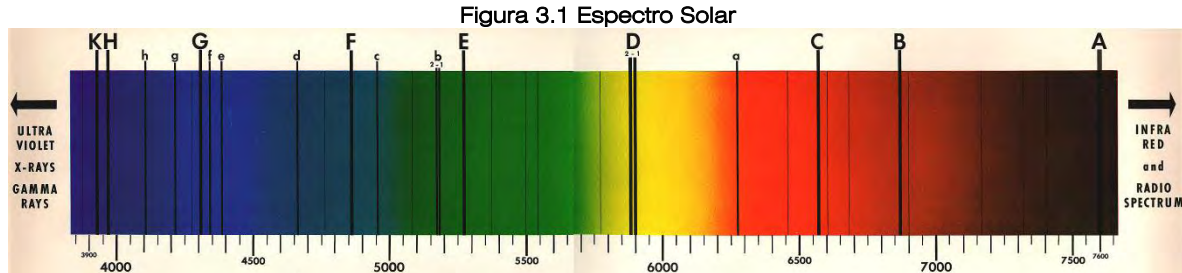
⁴⁰ SÁNCHEZ Op. cit.p. 33

⁴¹ US. Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy. Solar Energy Technologies Program

⁴² IEA-PVPS. International Energy Agency. Photovoltaic Power Systems Programme.

⁴³ SÁNCHEZ, Op. cit.,p. 33

La luz solar es el espectro de radiación electromagnética que proviene del sol, se divide principalmente en tres regiones: ultravioleta, luz visible e infrarrojo. Se diferencian de acuerdo a su longitud de onda, cada longitud de onda corresponde a una frecuencia y a una energía, mientras más corta sea la longitud de onda más altas serán la frecuencia y la energía, que se expresa en electronvoltios o “eV”. La región de la luz visible se muestra en la figura 3.1.



Fuente: NASA. National Aeronautics and Space Administration. <http://www.nasa.gov>

La mayor parte de la energía se encuentra en la región de la luz visible, las celdas utilizan principalmente ésta luz, sin embargo, dependiendo del material, responden de diferente manera a las diferentes longitudes de onda.

El silicio monocristalino puede usar todo el espectro visible y parte del infrarrojo, el silicio amorfo hace un mejor uso de los fotones de onda corta asociados con la radiación difusa o los días nublados. Algunas celdas de película delgada utilizan capas de diferentes materiales para captar un mayor rango del espectro solar⁴⁴.

La luz que incide sobre una celda solar puede ser reflejada, absorbida o pasar a través de ella, solo aquella que se absorbe puede producir electricidad. Alrededor de un tercio de la energía de la luz del sol incidente puede ser convertida en energía eléctrica. La luz que posee muy alta o muy baja energía no puede ser usada para generar electricidad y se transforma en calor.

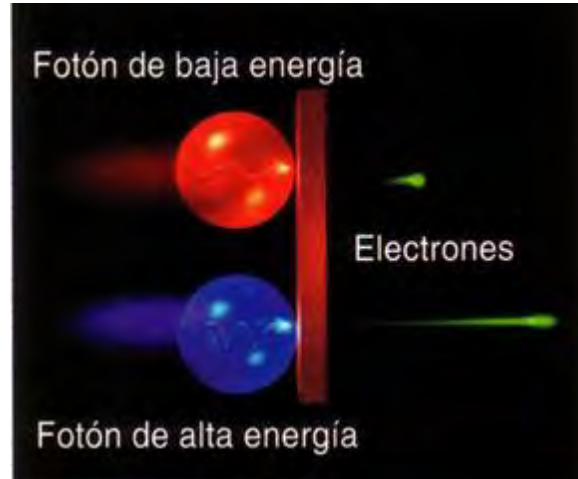
El efecto fotovoltaico en el que se basan las celdas solares es instantáneo y consiste en la interacción de la luz con los semiconductores, donde la energía que mantiene unidos a los electrones es similar a la energía de los fotones de la luz solar. Cuando la luz solar incide sobre el semiconductor los electrones rompen sus enlaces y quedan libres para circular por el semiconductor, creando una corriente eléctrica. Si el fotón tiene suficiente energía desprende un electrón, la energía que tienen los fotones depende de la luz de donde son emitidos como puede verse en la figura 3.2. La mayor energía proviene de la luz violeta y disminuye conforme se va acercando al rojo.

De acuerdo a la teoría cuántica, los electrones de un átomo pueden poseer únicamente determinados valores o niveles de energía. Los electrones de la última órbita del átomo ocupan niveles de energía altos, que les permiten escaparse del enlace que les une a su átomo. El conjunto de estos niveles forma parte de la llamada banda de conducción. Esta banda está formada además por niveles de energía vacíos que permiten que los electrones puedan saltar a ellos y que se muevan hacia la banda de conducción, donde pueden desplazarse con relativa libertad a través del interior del semiconductor⁴⁵.

⁴⁴ IEA-PVPS. International Energy Agency. Photovoltaic Power Systems Programme.

⁴⁵ US. Department of Energy. Solar Energy Technologies Program

Figura 3.2 Efecto Fotovoltaico



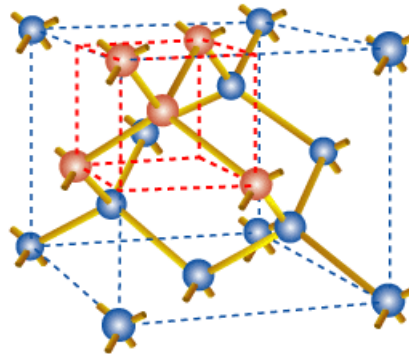
Fuente: El Tamiz. <http://eltamiz.com>

Los demás electrones del átomo, con energías menores forman la banda de valencia. Los semiconductores aumentan su conductividad con la temperatura, ya que la energía térmica suministrada es suficiente para que los electrones puedan saltar a la banda de conducción⁴⁶.

Los electrones que se encuentran en la órbita de la banda de conducción son golpeados por los fotones liberándose de los átomos y generando una corriente eléctrica.

El material más utilizado en la fabricación de celdas solares es el silicio, es un pobre conductor de la corriente eléctrica cuando todos los electrones están restringidos en enlaces, ya que cada átomo de silicio intenta unirse con cuatro átomos vecinos, como se puede ver en la figura 3.3. Se unen por medio de dos electrones compartidos. Los 4 electrones de la última órbita del átomo de silicio, conocidos como electrones de valencia, determinan como se organizan entre sí los átomos para formar un material de silicio sólido, por lo que deben romperse los enlaces para que pueda conducirse la electricidad y esto puede hacerse si se excitan los electrones, con un fotón de energía solar.

Figura 3.3 Átomo de Silicio



Fuente: US. Department of Energy. Solar Energy Technologies Program

⁴⁶ US. Department of Energy. Solar Energy Technologies Program

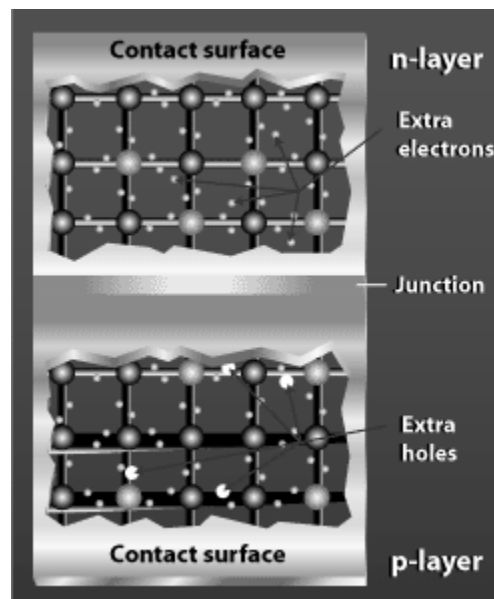
El silicio con enlaces rotos actúa como un conductor, de esta forma es más sencillo para un electrón de un enlace vecino saltar dentro de un sitio vacío dejado por el enlace roto. Ese salto restaura el enlace roto originalmente, pero deja un nuevo enlace roto detrás. El enlace del cual formaba parte el electrón tiene ahora un electrón menos que se conoce como hueco.

De este modo el enlace roto se puede mover a través del silicio, el enlace roto o hueco, puede ser imaginado como una partícula con carga eléctrica contraria a la del electrón liberado. Cuando un fotón rompe un enlace, se crean un electrón cargado negativamente y un hueco cargado positivamente, conocido como par electrón-hueco.

Los semiconductores se clasifican en dos tipos: los semiconductores intrínsecos y los semiconductores extrínsecos, la diferencia entre ellos consiste en que los extrínsecos han sido modificados agregándoles partículas o impurezas para aumentar su conductividad. Este procedimiento se conoce como dopaje, mediante el cual, se consigue que existan electrones libres en la banda de conducción, un ejemplo es el dopaje del silicio.

Las propiedades del silicio pueden ser alteradas por otros medios, por ejemplo, añadiendo pequeñas cantidades de impurezas, como el fósforo, el cual tiene cinco electrones de valencia, cuatro de ellos se usan en los enlaces entre los átomos de silicio vecinos y el quinto se encuentra libre y puede ser arrancado fácilmente. Una vez separado actúa de modo igual a un electrón liberado por absorción de luz. Si se añade boro al silicio, el cual tiene tres electrones de valencia sirve para introducir enlaces rotos o huecos en el material semiconductor (figura 3.4).

Figura 3.4 Dopaje de Silicio



Fuente: US. Department of Energy.
Solar Energy Technologies Program

El silicio con impurezas o dopado de fósforo es conocido como tipo negativo o tipo-n y el que esta dopado con boro es tipo positivo o tipo-p, su unión forma los dispositivos p-n.

Para crear un campo eléctrico dentro de la celda fotovoltaica se colocan dos placas, una de semiconductor tipo n con abundancia de electrones, con carga negativa y la otra placa de tipo p con abundancia de huecos con carga eléctrica positiva. La unión p-n sirve para que todos los electrones liberados se muevan en una dirección y que los huecos se muevan en dirección opuesta, causando un flujo de electrones liberados por la luz.

Los pares electrón-hueco, se mueven hasta la zona de unión en donde son separados por el campo eléctrico y enviados a un circuito eléctrico antes de que se recombinen. Se crea en ambos lados (placa n y placa p) una energía fotovoltaica que envía una corriente eléctrica fuera de la celda. El fotovoltaje generado, dependerá del material con que esté elaborada la celda solar.

En el funcionamiento de una celda fotovoltaica se deben tomar en cuenta los siguientes puntos:

- La intensidad de corriente producida por una celda fotovoltaica es proporcional a la radiación recibida en su superficie.
- Para cada material existe una frecuencia mínima de la radiación luminosa, por debajo de la cual no se presenta el efecto fotoeléctrico.
- Conforme la temperatura se reduce, se puede obtener un incremento en la eficiencia, la temperatura ideal para su funcionamiento no debe de exceder los 25° C.
- Para asegurar que no se sobre calienten hay que permitir la libre circulación del aire.

3.3 MATERIALES

Silicio monocristalino y policristalino.

El silicio es el material más utilizado actualmente para la fabricación de celdas solares, por ser más eficiente, además de que se encuentra en un constante proceso de mejora. Es el segundo material más abundante en la tierra después del oxígeno, aunque no se encuentra en estado puro y contiene elementos que son difíciles de eliminar.

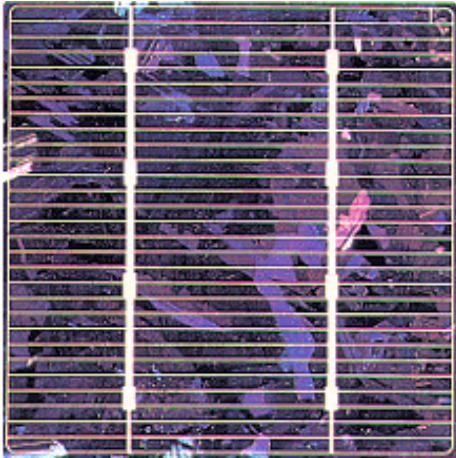
Los tipos de silicio más comunes son el monocristalino y el policristalino (figura 3.5). Las celdas monocristalinas se componen de secciones de un único cristal de silicio, se caracteriza por un ordenamiento periódico de átomos. El silicio se extrae de la arena, se purifica, se funde y se cristaliza en lingotes redondos. Una vez redondeado se corta en finas obleas, para conseguir celdas individuales. Las celdas se dopan con fósforo para obtener un material tipo “n” y con boro para un material tipo “p” y así obtener una homounión p-n, las obleas presentan un color uniforme, generalmente azul o negro.

Las celdas monocristalinas producen alrededor de 0.5 voltios, independientemente del área de la celda solar, consiguen un rendimiento aproximado del 19% en laboratorio y entre un 10 y un 15% en producción.

El silicio policristalino, se llama así porque se solidifica en varios cristales y no en uno solo, esto significa que el silicio es de menor pureza y por lo tanto de menor costo y no requiere de un control exhaustivo en su fabricación.

Esto da lugar generalmente a un rendimiento levemente más bajo, pero los fabricantes de las celdas policristalinas aseguran que las ventajas del costo compensan las pérdidas de la eficiencia. Las celdas policristalinas consiguen un rendimiento del 18% en laboratorio y entre un 10 y un 12% en producción.

Figura 3.5 La primera celda es de silicio policristalino, la segunda de silicio monocristalino



Fuente: Asesolar. Disponible en <http://www.asesolar.com>

Celdas de Película Delgada.

La mayor parte de la investigación tecnológica se enfoca en las celdas de película delgada. Generalmente son celdas que no son de silicio cristalino. Es una tecnología que permite el uso de otros materiales semiconductores, dependiendo del tipo de semiconductor, se pueden hacer celdas hasta de una micra de espesor.

Los materiales más utilizados para este tipo de celdas son el silicio amorfo, el telurio de cadmio (CdTe), el arseniuro de galio (GaAs), sulfuros y seleniuros de indio. Una ventaja es que pueden ser fabricados en grandes cantidades, tienen eficiencias que van del 7 al 9% y presentan la desventaja de que algunos de ellos pueden llegar a ser tóxicos.

Los módulos de película delgada se construyen depositando capas extremadamente delgadas de un material semiconductor o tintes solares, sobre diferentes materiales, como vidrio, acero inoxidable o plástico.

Dentro de las celdas de capa delgada la tecnología más avanzada comercialmente es la que utiliza silicio amorfo, éste material no tiene estructura cristalina y presenta defectos en sus enlaces atómicos. Está formado por capas delgadas sucesivas, por lo que es más económico ya que se utiliza mucho menos material semiconductor, el 1% o menos del silicio normal, se pueden hacer celdas en diferentes colores o translúcidas, módulos más grandes y no celdas individuales que tienen que ser montadas en marcos⁴⁷ (figura 3.6).

⁴⁷ Tratado de Cooperación Amazónica. "Sistemas Fotovoltaicos para electrificación rural: manual de entrenamiento". Lima (PE). TCA 1994

Figura 3.6 Celdas de Silicio Amorfo



Fuente: Ayudas Energía. Disponible en <http://www.ayudasenergía.com>

Posee un alto coeficiente de absorción pero absorbe solamente el espectro visible de la luz y presenta la desventaja de tener niveles más bajos de eficiencia debido a un alto nivel de recombinación de los electrones. Otro problema del silicio amorfo es su degradación o disminución de su eficiencia tras una prolongada exposición a los rayos solares, a pesar de que el material es muy estable y el comportamiento frente a agentes externos como humedad, temperatura y corrosión es muy bueno, en las cien primeras horas de funcionamiento se produce una degradación hasta que se estabiliza y la producción de corriente es prácticamente estable después⁴⁸.

Las celdas presentan un rendimiento de 11.5% en laboratorio y hasta el 8% en producción, pero si se les agrega hidrógeno pueden mejorar su eficiencia, llegando a valores del 10%, que les permite ser comercialmente competitivas.

En el silicio amorfo los átomos no están localizados a distancias y ángulos únicos, tiene enlaces incompletos, la incorporación de hidrógeno reduce los enlaces incompletos permitiendo la obtención de un material tipo "p" o "n" según el dopaje introducido.

Una solución al problema de los bajos niveles de eficiencia es unir dos o más celdas solares. De este modo, cada una de las celdas permanecerá delgada y relativamente estable, mientras el grosor total es lo suficientemente grande para captar una mayor parte del espectro solar.

Con la multiunión de celdas se pueden obtener mejores eficiencias de conversión capturando una mayor parte del espectro solar. Se fabrican sobreponiendo celdas con diferentes valores de absorción de los fotones. Son colocadas de tal forma que la luz del sol llega primero al material que requiere fotones de mayor energía, los fotones que no son absorbidos en la primera capa son transmitidos a la segunda, donde pueden ser absorbidos y deja pasar los de menor energía. Este proceso de absorción selectiva continúa hasta la celda final con el valor de absorción más bajo.

⁴⁸ ALCOR CABRERIZO, Enrique. "Instalaciones solares fotovoltaicas". 3ª. Edición. España: Progensa 2002

La multiunión del arseniuro de galio (GaAs) es otra clase de película fina de alta eficiencia diseñada normalmente para el uso industrial espacial. Se compone de capas de diversos materiales de película fina, que absorben un diverso espectro de la luz. Puede llegar a tener una eficiencia de 39%, un valor que otras celdas solares pueden alcanzar solamente en condiciones de laboratorio y no en condiciones de fabricación, el problema es que aún es una tecnología muy costosa⁴⁹.

Otros materiales que se utilizan para la elaboración de celdas de película delgada son el telurio de cadmio (CdTe) y el cobre-indio-diselenio (CuInSe₂), presentan un costo menor y una eficiencia aceptable.

El uso de celdas solares de lámina delgada puede significar una disminución en los costos y reducir los requerimientos energéticos de producción en comparación con las celdas de silicio cristalino (monocristalino y policristalino). Muchos estudios predicen que las celdas solares de lámina delgada podrían obtener una eficiencia del 15% a menor costo que las celdas convencionales de silicio.⁵⁰

Rendimiento de una celda

Por eficiencia se entiende el porcentaje de luz solar que es transformado en electricidad. Es el coeficiente de la potencia eléctrica que produce el módulo fotovoltaico y el total de la irradiación recibida en una celda a determinada temperatura. Esto se puede calcular dividiendo la potencia P en watts, entre el área del módulo, en metros cuadrados, multiplicada por la irradiación total en watts por metro cuadrado:

$$\text{Coeficiente de eficiencia} = \frac{\text{Potencia}}{\text{Área del módulo} \times \text{Irradiación}}$$

Considerando el valor de 1000 watts/m² para la irradiación que alcanza la superficie terrestre en un área de 1m² para un módulo fotovoltaico con una potencia de 150 watts se tiene:

$$\text{Coeficiente de eficiencia} = \frac{150 \text{ watts}}{1 \text{ metro} \times 1000 \text{ watts/m}^2} = 0.15 = 15\%$$

El coeficiente de absorción de una celda depende de dos factores el material del que está hecha la celda y de la longitud de onda o energía de la luz que se va a absorber, indica cuanto puede penetrar la luz dependiendo de su energía, un bajo coeficiente de absorción indica que la luz no es absorbida fácilmente por el material.

La intensidad de corriente que genera el panel, aumenta con la radiación que recibe, y el voltaje permanece constante. Por ello tiene mucha importancia la colocación de los paneles, su orientación e inclinación respecto a la horizontal, ya que los valores de la radiación varían a lo largo del día en función de la inclinación del sol respecto al horizonte.

⁴⁹ SÁNCHEZ JUÁREZ, Aarón. Tecnologías Fotovoltaicas. Estado Actual y Futuro Solar. Departamento de Materiales Solares. CIE UNAM Edición 2007

⁵⁰ GREEN, Martin. "Energía Fotovoltaica. De la luz solar a la electricidad usando células solares"

Parámetros que definen una celda solar:

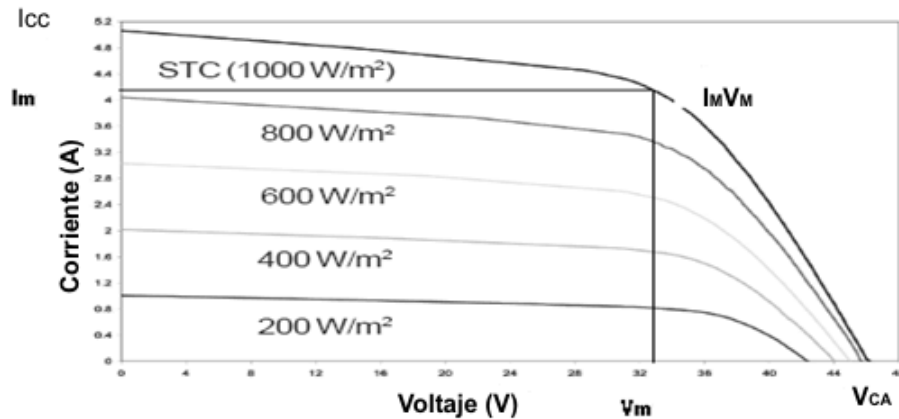
La figura 3.7 presenta la curva de Intensidad (I) voltaje (V) de una celda solar, existen tres puntos que definen el comportamiento de la celda:

Corriente a corto circuito (I_{cc}). Representa la máxima corriente que puede generar la celda solar, es el punto en donde la curva corta al eje vertical

Voltaje a circuito abierto (V_{ca}). Es la tensión o voltaje máximo que genera una celda en iluminación y depende de los materiales con que esté fabricada, es el punto donde la curva pasa por el eje horizontal.

Potencia pico (I_mV_m). Es el punto en donde el producto de la intensidad producida y la tensión es máximo. Es la potencia máxima que puede suministrar un módulo.

Figura 3.7 Curva intensidad-Voltaje a diferentes niveles de Irradiación



Fuente: Roanakh. Designs for Solar Electricity. Disponible en <http://www.roanakh.com>

En las celdas de silicio un aumento de temperatura incrementa la corriente, pero al mismo tiempo disminuye la tensión. El efecto global es que la potencia del panel disminuye al aumentar la temperatura de trabajo del mismo.

Una radiación de 1000 W/m² es capaz de calentar un panel unos 30 grados por encima de la temperatura del aire circundante, lo que reduce la tensión aproximadamente en un 15%. Por ello es importante colocar los paneles en un lugar en el que estén bien ventilados.

Las condiciones estándar para el funcionamiento de una celda solar especifican una temperatura de 25°C y una irradiancia de 1000 watts/m² con una masa de aire de 1.5 (MA1.5). Corresponde a la irradiación y espectro solar incidente en un día claro sobre una superficie inclinada con respecto al sol. Bajo estas condiciones una celda solar tipo de 100cm² y una eficiencia del 12% puede llegar a producir 1.2 watts⁵¹. Las principales eficiencias de los diferentes materiales se muestran en la Tabla 3.1

⁵¹ US. Department of Energy. Solar Energy Technologies Program

Tabla 3.1 Comparativa de Eficiencias de las principales celdas fotovoltaicas

	SILICIO MONO-CRISTALINO	SILICIO POLI-CRISTALINO	SILICIO AMORFO	ARSENIURO DE GALIO GaAs	TELURIO DE CADMIO CdTe	CIS, COBRE INDIO DISELENIO (CuInSe ₂)
Eficiencia	14-17% máxima eficiencia alcanzada 24.7% (iea-pvps)	12-14%	4-6% individual / 7-10% multiunión eficiencia del 3.5% en los 80s hasta 7% en la actualidad (iea-pvps)	32.5% (lab.)	10%	12%
Ventajas	Alto rendimiento Estable Tecnología fiable	Buen rendimiento Costo moderado Fabricación más sencilla Mejor ocupación del espacio	Costo moderado Buen rendimiento con baja radiación Flexible	Alta resistencia a las altas temperaturas (adecuado para los concentradores)	Bajo costo	Muy estable
Desventajas	Costo Elevado Complejidad	Complejidad Sensibilidad a las impurezas	Bajo rendimiento Deterioro inicial Estabilidad durante años	Toxicidad Disponibilidad del material	Toxicidad Disponibilidad del material	Toxicidad (Cd)

Fuente: International Energy Agency (IEA).

3.4 INTEGRACIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

El conjunto de elementos que se utilizan para generar y transmitir electricidad a partir de la energía solar se conoce como sistema solar fotovoltaico. Está integrado por diferentes subsistemas que realizan diversas funciones, los más importantes son:

- Captación de energía
- Regulación y adaptación del suministro eléctrico
- Acumulación

Subsistema de captación de energía

La parte más pequeña del sistema de captación es la celda fotovoltaica. La celda es un diodo que permite a la corriente eléctrica fluir en un solo sentido. Una celda produce de 1 a 2 watts

de potencia y la tensión que se genera en ella es aproximadamente 0.5 volts, es casi constante variando ligeramente con la temperatura.⁵²

Para obtener potencias mayores se conectan varias celdas, formando un módulo fotovoltaico, los módulos más comercializados son los de silicio monocristalino y policristalino. Un módulo fotovoltaico generalmente está formado por una serie de circuitos de 30 a 36 celdas encapsuladas entre un material transparente y un material plástico en la parte posterior, otras partes del módulo son el marco, soporte y contactos eléctricos de salida, por medio de estos contactos la corriente eléctrica se extrae del panel. Son fabricados en potencias de 50 W hasta 200 W y voltajes de 6 V, 12 V y 24 V. Los módulos de película delgada pueden ser flexibles con material transparente en la parte frontal.

A su vez los módulos se conectan en serie o en paralelo para formar un arreglo fotovoltaico. La conexión y dimensión del arreglo, dependen de la cantidad de irradiación del lugar y de la energía requerida. Si se conectan los módulos en serie se aumenta el voltaje y se conserva la corriente, cuando los módulos se conectan en paralelo se conserva el voltaje y aumenta la corriente.

Subsistema de regulación y adaptación del suministro eléctrico

Está formado por dos dispositivos el regulador o controlador de carga y el inversor de corriente. Debido a que la potencia varía con la iluminación se requiere un dispositivo que mida la potencia y el voltaje y que ajuste la carga en tiempo real para transferir siempre la misma potencia a pesar de las variaciones de irradiación.

El regulador de carga, como su nombre lo indicia, regula los ciclos de carga y descarga de la batería y limita la tensión a valores adecuados, evita que una sobrecarga excesiva del panel dañe la batería, acortando su vida útil. Hace que el sistema de generación se desconecte o dirija la corriente a otra parte cuando las baterías están cargadas.

Un sistema fotovoltaico genera energía eléctrica en corriente directa que puede ser usada directamente en algunos aparatos, sin embargo la mayoría requiere de corriente alterna por lo que debe ser convertida o almacenarse para su posterior uso. El inversor convierte la corriente directa de salida, de 12 V ó 24 V del arreglo fotovoltaico o de la batería, en corriente alterna que es el tipo de corriente que se utiliza en la red de distribución eléctrica y en el consumo doméstico, de 120 ó 240 voltios generalmente.

Subsistema de acumulación

Está formado por las baterías, que almacenan la energía generada. Se compone esencialmente de dos electrodos sumergidos en un electrolito donde se producen reacciones químicas, en el proceso de carga la energía eléctrica se convierte en energía química y en el proceso de descarga la energía química es transformada en electricidad. Las baterías reciben la carga en corriente directa del panel fotovoltaico y proporcionan un voltaje también en corriente directa.

La capacidad de una batería es la cantidad de electricidad que puede obtenerse durante una descarga, si se encuentra completamente cargada. Se mide en amperios-hora (Ah). Para la mayoría de las aplicaciones los voltajes utilizados son múltiplos de 12 V, por ejemplo una batería de 50 Ah y 48 V, almacenara: $50 \times 48 = 2400$ watts-hora de electricidad.

⁵² US. Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy. Solar Energy Technologies

La profundidad de descarga es el porcentaje de la carga total que se ha sacado de la batería. La vida de las baterías está directamente relacionada con su profundidad de descarga. Se expresa en ciclos, que es el número de veces que se produce una carga-descarga.

El objetivo de las baterías es almacenar la electricidad generada para poder proporcionar energía durante las noches y en los días de baja radiación. Deben soportar varios ciclos de carga y descarga y asegurar la estabilidad del voltaje.

En general las baterías necesitan reemplazarse cada 5 o 10 años, presentan pérdidas durante los procesos de carga y descarga y una eficiencia alrededor del 80%.

Las baterías se deben instalar en un ambiente de temperatura controlada y con ventilación adecuada, debido a la liberación de gases que se dan en los procesos químicos.

En los sistemas fotovoltaicos se utilizan baterías de ciclo profundo ó ciclo poco profundo y pueden ser de plomo-ácido, níquel-cadmio o gel.

Las de níquel-cadmio son las que presentan mejor funcionamiento pero debido a su alto costo tienen un menor uso, por esta razón son más utilizadas las de plomo-ácido.

Baterías de plomo- ácido

Las baterías de plomo-ácido son las más usadas en los sistemas fotovoltaicos. La unidad de construcción básica de una batería de este tipo es la celda de 2 voltios.

Las baterías de plomo ácido pueden ser divididas en dos tipos: las de descarga superficial y las de descarga profunda.

- Plomo-antimonio (Pb-Sb) de tipo estacionario y de ciclo profundo, recomendadas donde el ciclo diario supere el 15%. Requieren de un alto consumo de agua
- Plomo calcio (Pb-Ca) de tipo monoblock de 12 V y capacidades máximas de 150 Ah, son recomendables para pequeñas instalaciones donde el ciclo de descarga diario no supere el 10%. Tienen una vida útil más corta que las de plomo-antimonio⁵³.

Baterías de Níquel-Cadmio

Las principales características de las baterías de níquel-cadmio son: tensión nominal por elemento de 1.2 voltios; pueden soportar mejor descargas elevadas, hasta del 90% de su capacidad; presentan una vida útil más larga que las de plomo-ácido en iguales condiciones de trabajo, además de que requieren menos mantenimiento y soportan condiciones extremas, sin embargo, su costo es muy elevado comparado con las de plomo-ácido⁵⁴.

Baterías de gel

Es una batería de plomo-ácido, cuentan con un electrolito de tipo gel, su consistencia puede variar desde un estado muy denso hasta uno similar a una jalea. No se derraman, pueden

⁵³ ALCOR Op. cit.,p. 41

⁵⁴ Idem

montarse en casi cualquier posición y no requieren mantenimiento, sin embargo, no admiten descargas profundas⁵⁵.

Los sistemas fotovoltaicos se clasifican principalmente en autónomos y conectados a la red. El subsistema de acumulación es el que diferencia los dos tipos de sistemas.

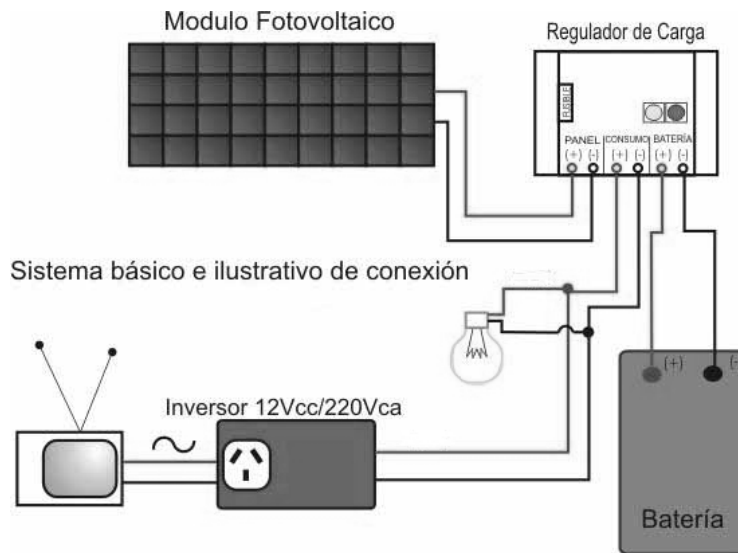
3.4.1 SISTEMAS AUTÓNOMOS

Se conoce como sistema autónomo aquel que genera energía eléctrica sin estar conectado a la red de distribución. Generalmente estos sistemas se utilizan en zonas rurales, en comunidades aisladas donde resulta muy costoso llevar la energía eléctrica. También son empleados para telecomunicaciones y bombeo (Figura 3.8).

Los principales componentes de un sistema autónomo son:

- Captación de energía
- Regulación y adaptación del suministro eléctrico
- Acumulación

Figura 3.8 Sistema Fotovoltaico Autónomo



Fuente: Gier Solar. <http://www.giersolar.es>

En un sistema autónomo las baterías y los módulos trabajan conjuntamente para alimentar las cargas. Durante la noche toda la energía demandada por la carga la proveen las baterías. Por la mañana los módulos comienzan a generar electricidad, pero si la corriente que producen es menor que la que la carga requerida, la batería proporcionará la energía que haga falta. A partir de una determinada hora de la mañana la energía generada por los módulos fotovoltaicos puede superar la energía requerida, en estos momentos es cuando los excesos de energía pueden ser almacenados en la batería, esta empezará a cargarse y a recuperarse de su descarga de la noche anterior. Finalmente durante la tarde, la corriente generada disminuye y cualquier diferencia con la demanda la proveerá la batería.

⁵⁵ALCOR Op. cit.,p. 41

En ocasiones se cuenta con un generador auxiliar en los momentos de insuficiente radiación, generalmente está constituido por un grupo termoelectrónico alimentado por diesel o gasolina.

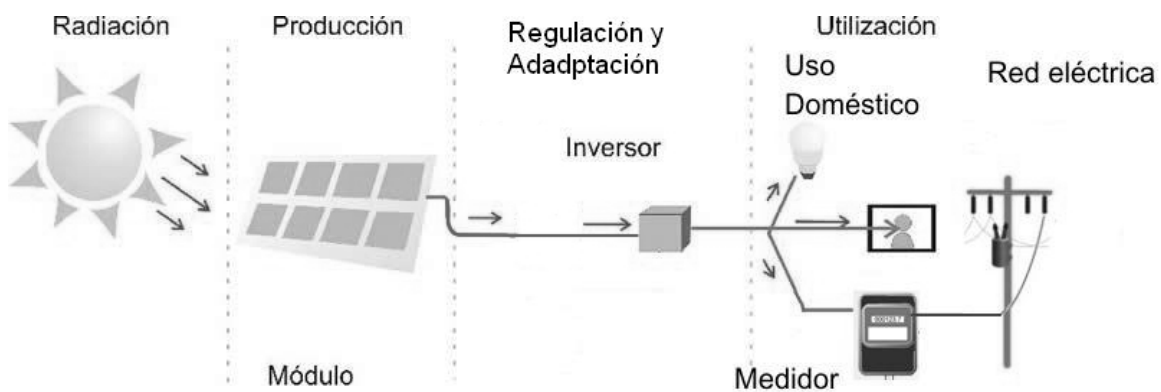
3.4.2 SISTEMAS CONECTADOS A LA RED

Los sistemas conectados a la red están constituidos de una forma similar que la de los sistemas autónomos, sus principales partes son:

- Captación de energía
- Adaptación del suministro eléctrico

Como puede verse en la figura 3.9 la principal diferencia es la ausencia del regulador de carga y de las baterías, lo que permite reducir el costo, en este caso el respaldo es proporcionado por la red eléctrica. El inversor de corriente es muy importante ya que debe sincronizar la corriente alterna con la red de distribución eléctrica.

Figura 3.9 Sistema Fotovoltaico conectado a la Red



Fuente: IIE. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Proyecto Fotovoltaico

Inicialmente, los sistemas conectados a la red se diseñaron y calcularon para la construcción de centrales fotovoltaicas. Después de observar que las centrales fotovoltaicas funcionaban correctamente y con los avances tecnológicos de los inversores, no se tardó en pensar que estos sistemas podrían ser realizados a potencias menores, con el fin de ser empleados para uso doméstico, adaptándose a viviendas conectadas a la acometida convencional de electricidad.⁵⁶

Este tipo de instalaciones a mayor escala podría resolver en un futuro algunos problemas en la generación y distribución de energía eléctrica convencional. El problema de las compañías de electricidad se halla en que sus centrales funcionan al 100% en ciertos momentos pico del día, mientras que durante la noche, su tasa de funcionamiento es muy baja. Esto hace que el precio por kilowatt hora producido sea bajo cuando la central rinde toda su potencia y considerablemente más alto cuando su funcionamiento está en un 50% de su potencia nominal.

Si una central eléctrica estuviera rodeada de viviendas con generadores fotovoltaicos y fueran capaces de proporcionar energía suficiente para que los picos de demanda, que generalmente

⁵⁶ ALCOR Op. cit., p. 41

se producen durante el día, fueran suministrados por medio de la energía producida por los módulos, la central podría ser de una potencia que rindiera siempre el 100%. De esta forma el costo de producción sería más barato que el de una central con producción variable y menos contaminante. Otra ventaja es que se evitarían las pérdidas por transporte de energía generada ya que se produciría donde se consume.

Los paneles fotovoltaicos tienen una vida útil de 20 años bajo condiciones normales. Los fabricantes de módulos fotovoltaicos están desarrollando módulos que pueden integrarse a las construcciones como componentes de las mismas, como parte de los muros o tejas fotovoltaicas con lo que se logra reducir en parte, el costo del sistema.

Debido al costo actual de la tecnología el uso de sistemas fotovoltaicos es más aceptado en zonas alejadas de la red eléctrica. Sin embargo su uso en áreas urbanas como apoyo a las redes de distribución eléctrica debe de considerarse debido a los problemas que se presentarán por la falta de combustibles fósiles para generar electricidad además de la reducción de emisiones contaminantes. Una opción para que sea más factible su instalación es el apoyo por parte de las entidades gubernamentales, como se ha hecho en otros países, en donde los sistemas que se encuentran conectados a la red general de distribución eléctrica pueden exportar los excesos de electricidad que producen durante el día y tomar la energía de la red que necesiten durante la noche.

3.5 EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA

Actualmente se realizan investigaciones para mejorar los rendimientos y reducir costos, además de que se trabaja en nuevos materiales.

Figura 3.10 Celdas esféricas



Fuente: Kyosemi. <http://www.kyosemi.co.jp>

Un ejemplo son las celdas solares de silicio con forma esférica, tienen entre 1 y 1.5mm de diámetro, Sphelar®, es el producto desarrollado por la empresa japonesa Kyosemi (Figura 3.10). Consiste en una matriz de pequeñas celdas solares esféricas capaces de absorber la radiación solar con cualquier ángulo, aprovechando tanto la radiación reflejada como la difusa. Los fabricantes dan un grado de eficiencia superior al de las celdas planas convencionales de silicio, llegando a rendimientos del 20%.

La colocación de las celdas en un material flexible y transparente, permite convertir superficies acristaladas en generadores de electricidad.

Según la empresa, los costos de producción se reducen a la mitad, comparándolo con la fabricación de las celdas de silicio convencionales, ya que el silicio empleado se aprovecha eficientemente tanto en la fabricación de las celdas como en la producción de energía.

Las tendencias en la fabricación de celdas fotovoltaicas se dirigen hacia el uso de la nanotecnología que permite conseguir mayor eficiencia con menos material, lo que implica una reducción de costos. Se basa en una manipulación de las estructuras a nivel molecular y

atómico, ya que a este nivel, las propiedades físicas y químicas de la materia cambian. Las nuevas tecnologías utilizadas para fabricar celdas solares de película delgada que usan la nanotecnología pueden clasificarse en tres grupos: tintes fotosensibles, celdas orgánicas y celdas híbridas que combinan un material orgánico y uno inorgánico.

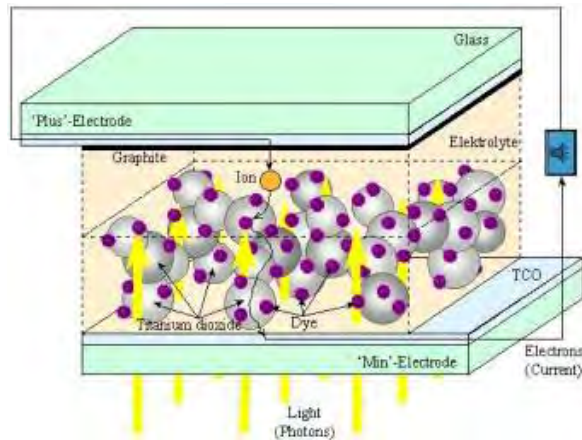
Los tintes simulan el proceso de la fotosíntesis para generar una corriente eléctrica. Los dos tintes desarrollados por los científicos del Centro de Investigación de Nanomateriales de la Universidad de Massey, en Nueva Zelanda contienen clorofila y hemoglobina. Según los investigadores estos tintes presentan muchas ventajas respecto a las celdas convencionales de silicio:

- Producen una cantidad de corriente aceptable incluso con cielo nublado y no son sensibles a la temperatura.
- Son más económicas, aproximadamente 10 veces más barato que fabricar las celdas de silicio monocristalino y policristalino, además de que permiten entintar ventanas y cubiertas.
- Su fabricación es mucho menos contaminante que los paneles convencionales. Refinar el silicio requiere de una cantidad mayor de energía que la que se utiliza en la fabricación de estos tintes.

Para mejorar el rendimiento se utilizan celdas híbridas, en las que se combina un semiconductor inorgánico y un colorante de tipo orgánico. Están formadas por un electrolito con iones de yoduro (átomos de yodo con un electrón de más), un electrodo normal, y otro electrodo en el que hay dióxido de titanio nanocristalino poroso, que solo absorbe la luz ultravioleta, empapado del tinte, que capta la luz del espectro visible, de esta forma se mejora el rendimiento. El semiconductor se encarga de transportar las cargas y el tinte fotosensible de separar los electrones.

El proceso mediante el cual se genera electricidad tiene el mismo principio de los semiconductores, cuando los fotones de la luz solar inciden sobre el tinte, el fotón proporciona suficiente energía a los átomos para desprender un electrón. Este electrón salta a la banda de conducción del dióxido de titanio, que a su vez lo pasa por el cable al electrodo opuesto. Pero al mismo tiempo los átomos del tinte, que han perdido un electrón lo recuperan tomándolo de los iones de yoduro, convirtiéndolos en átomos de yodo. Estos átomos necesitan obtener el electrón que han perdido, y lo obtienen del electrodo opuesto al del dióxido de titanio, donde el electrón arrancado había viajado, obteniendo un circuito cerrado. Se conocen también con el nombre de célula Gratzel (Figura 3.11).

Figura 3.11 Celdas Fotosintéticas



Fuente: Photovoltaic and optoelectronic devices group. Universitat Jaume I.

Una desventaja de este tipo de tecnología es que se degrada rápidamente por efecto de la luz y tiene una eficiencia de conversión del 10%.

El otro tipo de celdas son las de polímeros u orgánicas, se denominan orgánicas porque son moléculas que contienen carbono, aunque hay que tener en cuenta que no todas las moléculas que contienen carbono son orgánicas. Los polímeros son moléculas orgánicas artificiales, son compuestos químicos en los que se repiten unidades estructurales básicas, de forma que se pueden crear cadenas muy largas que dan a los materiales determinadas propiedades⁵⁷.

Las celdas orgánicas constan de dos polímeros diferentes, uno que funciona como donador de electrones y otro que es el receptor, de esta forma el polímero es capaz de absorber una parte de la luz que recibe provocando un movimiento de electrones, los electrones se mueven en una dirección y provocan una separación de carga. La zona hacia la que se desplazan se carga negativamente y la zona de la que han salido queda cargada positivamente. Su movimiento genera una corriente eléctrica, igual que en las celdas de silicio. La celda orgánica puede hacerse con polímeros semiconductores y con compuestos orgánicos nanomoleculares o combinarse con materiales inorgánicos para formar celdas híbridas. Este tipo de película delgada también se degrada rápidamente por efecto de la luz y posee una eficiencia de conversión del 5%⁵⁸.

Las ventajas que presenta es que el proceso de fabricación puede ser más económico y su uso es más versátil. Al estar formada por compuestos de carbono el material resultante es ultra fino, ligero y flexible y puede colocarse sobre cualquier superficie.

Por otra parte la nanotecnología se utiliza para mejorar la eficiencia del silicio y otros materiales semiconductores. El silicio nanocristalino, es una clase de silicio amorfo más estable en donde los cristales de silicio son mucho más pequeños lo que permite una mayor movilidad de los electrones, absorbe un espectro más amplio de la luz y permite hacer celdas flexibles. Las celdas tridimensionales consisten en colocar un material semiconductor sobre una nanoestructura tridimensional de carbono en donde penetre la luz, esta estructura no permite que la luz se refleje y puede ser absorbida más fácilmente que en una superficie plana, como las de las celdas convencionales⁵⁹.

Por el momento estas tecnologías presentan rendimientos de alrededor del 5% y para poder ser comercialmente competitivas necesitan una eficiencia mínima del 10%, sin embargo son tecnologías en desarrollo y con el tiempo se espera que mejoren su eficiencia y que el costo de fabricación sea mucho menor que el de las de silicio, utilizadas actualmente.

3.6 INTEGRACIÓN ARQUITECTÓNICA

Los sistemas fotovoltaicos han evolucionado de ser una instalación adosada hasta convertirse en un elemento aplicable al diseño arquitectónico y constructivo. Actualmente se comienzan a fabricar diferentes elementos como láminas fotovoltaicas flexibles que pueden ser

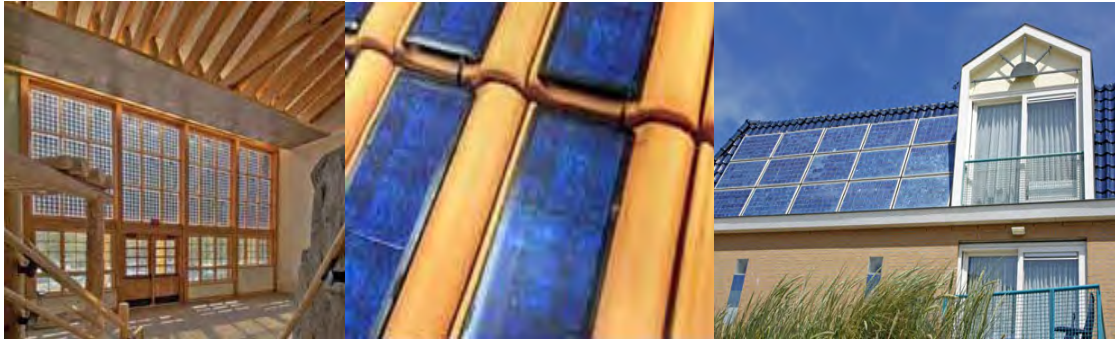
⁵⁷ NREL. National Renewable Energy Laboratory. Photovoltaic Cells Based on Conducting Polymers. Disponible en <http://www.nrel.gov/docs>

⁵⁸ HUYNH Wendy U. DITTMER Janke J., "Hybrid Nanorod-Polymer Solar Cells". Department of Chemistry, University of California, Berkeley and Materials Science Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA. Disponible en: <http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/295/5564/2425>

⁵⁹ NREL. National Renewable Energy Laboratory. <http://www.nrel.gov/news/press/2005/350.html>

transparentes o semitransparentes, celdas en diversos colores y tejas fotovoltaicas, entre otros, por lo que puede suponerse que su uso será cada vez más frecuente.

Figura 3.12 Elementos Fotovoltaicos



Fuente: Amordad Solar. <http://www.amordad.es>

Un elemento fotovoltaico integrado es aquel que ocupa grandes superficies de fachadas o cubiertas y que cumple principalmente con dos funciones, ser un elemento arquitectónico y generar electricidad durante el día, que es utilizada para cubrir las demandas eléctricas de la edificación (figura 3.12).

Pueden utilizarse módulos opacos sobrepuestos al material de la envolvente o cristal semitransparente con las celdas integradas, permitiendo el paso de la luz natural en domos o ventanas, de esta forma se reduce el costo del sistema ya que sustituye parte de los materiales de construcción y no requiere de sistemas adicionales para su instalación.

Esta aplicación ofrece mayor flexibilidad de diseño. En el caso de fachadas el rendimiento de los elementos fotovoltaicos es menor ya que se encuentran a 90° y en diferentes orientaciones, a diferencia de la integración sobre la cubierta de una construcción, pero la reducción de la eficiencia del sistema se compensa, en cierta medida, al cubrir un área mayor.

La utilización de un sistema fotovoltaico, como instalación o integrado en cualquier proyecto arquitectónico implica una inversión elevada, la duración de este es garantizada hasta por 25 años, aunque la experiencia ha demostrado una vida útil superior a los 30 años, logrando una amortización de la inversión inicial en un período de tiempo de 10 años aproximadamente. Entonces podemos contar con un ciclo de vida de alrededor de 15 años o más, que serán de generación de energía eléctrica, siempre y cuando se dé un correcto mantenimiento al sistema⁶⁰.

En la mayoría de los casos se utiliza la tecnología del silicio, monocristalino, policristalino y amorfo, debido a que las nuevas tecnologías de celdas con tintes y de polímeros aun no se comercializan. Las más utilizadas son las de silicio amorfo de película delgada ya que presentan ventajas debido a que su rendimiento es mayor en situaciones desfavorables de baja radiación, como es el caso de la iluminación difusa o sombras, además de que su eficiencia no se ve alterada por las bajas o altas temperaturas. Las celdas se encuentran dentro del vidrio para darles la resistencia que necesitan y ofrecen también variedad de colores para el diseño.

Un ejemplo de integración arquitectónica en viviendas fue realizado por el despacho de arquitectos Bear Architecten Guda en Holanda.

⁶⁰ BEHLING, Sophia, BEHLING Stefan y SCHINDLER, Bruno. "Sol Power". Editorial Gustavo Gili, S.A. Barcelona, 2002

Es un proyecto de 36 departamentos para gente mayor, 25 casas en terraza y 11 casas unifamiliares, donde se integran los sistemas fotovoltaicos en las cubiertas (figura 3.13).

Figura 3.13 Cubiertas fotovoltaicas



Fuente: © BEAR Architecten Gouda (NL)

El segundo ejemplo se trata de un conjunto de 43 casas que cuentan con un techo energético con módulos fotovoltaicos (alrededor de 45m² por casa). Esta cubierta sobresale una tira de viviendas, lo que significa que el sistema es de fácil acceso para su mantenimiento y si es necesario puede expandirse. La ventilación ayuda al buen funcionamiento del sistema (figura 3.14).

Figura 3.14 Cubiertas fotovoltaicas



Fuente: © BEAR Architecten Gouda (NL)

4. ANÁLISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO

4.1 MARCO LEGAL

No existe una normatividad específica para la instalación de sistemas fotovoltaicos en la República Mexicana, sin embargo, existen leyes y reglamentos que pueden aplicarse para su uso, la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE) y su reglamento consideran la autogeneración de electricidad.

La Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE) regula la provisión de electricidad en México, en el artículo 36 de la ley y en los artículos 72 y 77 del reglamento de la misma, se señala que la Secretaría de Energía Minas e Industria Paraestatal con la opinión de la Comisión Federal de Electricidad, otorgará permisos a particulares para autoabastecimiento, cogeneración, producción independiente o pequeña producción, destinada al abastecimiento para satisfacer necesidades propias. Los particulares deben de poner a disposición de la Comisión Federal de Electricidad sus excedentes de producción y no puede ser entregada a terceros.

De acuerdo al artículo 101 del Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, se entiende por autoabastecimiento a la utilización de energía eléctrica para fines de autoconsumo siempre y cuando dicha energía provenga de plantas destinadas a la satisfacción de las necesidades del conjunto de los copropietarios o socios.

El artículo 39 de la ley y el 89 del reglamento, especifican que no se requerirá permiso para el autoabastecimiento de energía eléctrica cuando no se excedan los 0.5 Mega Watts.

También se puede generar electricidad para complementar procesos productivos mediante la cogeneración, o de importación o exportación de energía eléctrica, sujetos a permiso de la Comisión Reguladora de Energía (CRE), de acuerdo a las condiciones establecidas para cada caso.

En Diciembre del 2005 se aprobó en la Cámara de Diputados la iniciativa de Ley para el Aprovechamiento de las Fuentes Renovables de Energía (LAFRE), en la que se define como meta para el 2012, un porcentaje mínimo de participación de las Energías Renovables del 8%, en sus distintas modalidades, respecto a la generación total de electricidad.⁶¹ Desafortunadamente la iniciativa de Ley no se ha aprobado aún.

La iniciativa de Ley señala, que los pagos pueden ser compensados gracias a la energía que los particulares generen y entreguen al Sistema Eléctrico Nacional, el cual deberá aceptar la electricidad generada a partir de Fuentes Renovables en cualquier momento que se produzca.

La iniciativa da a la Comisión Reguladora de Energía (CRE) la facultad de establecer los procedimientos de intercambio de energía eléctrica entre las redes del servicio público y los usuarios que generen electricidad de pequeña escala a partir de fuentes renovables de energía.

Un avance más se dio en junio de 2007, cuando se hizo oficial el uso de medidores bidireccionales para fuentes de energía solar a pequeña escala para autoconsumo. El contrato de interconexión se aplica a los generadores con fuente de energía solar en pequeña escala

⁶¹ ESTRATEGIA NACIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO. México 2007. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Mayo 2007
ISBN: 968-817-837-3

con capacidad hasta de 30kW, que se interconecten a la red eléctrica en tensiones inferiores a 1kV y que no requieren del uso de la red para sus necesidades de electricidad, con una duración indefinida. Se aplica a personas físicas y morales, quienes se comprometen a poner la energía a disposición de la compañía suministradora de energía eléctrica (Comisión Federal de Electricidad (CFE) o Luz y Fuerza del Centro (LFC)).

El contrato establece que la potencia máxima para uso residencial será de 10kW y de 30kW para uso general, en baja tensión. Los medidores deberán permitir la medición neta entre la energía eléctrica entregada por la red al particular y la entregada por el generador con fuente de energía solar a la red. El consumo se determinará como la diferencia entre la energía entregada por la red y la entregada por el generador a la red, cuando la diferencia sea negativa se considerará como un crédito a favor que podrá ser compensado dentro del período de 12 meses siguientes, si no se realiza en dicho período, el crédito a favor será cancelado; cuando la diferencia sea positiva se facturará de acuerdo a la tarifa aplicable.

Como cualquier otra instalación eléctrica, la instalación de un sistema fotovoltaico debe realizarse adecuadamente y en forma segura, tanto la conexión como la desconexión eléctrica así como protección contra fallas a tierra, para proporcionar la protección adecuada del equipo y de las personas. Por lo que deben seguirse las normas y recomendaciones establecidas en la Norma Oficial Mexicana referente al uso de instalaciones eléctricas NOM-001-SEDE-2005.

4.2 ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN MÉXICO Y EL MUNDO

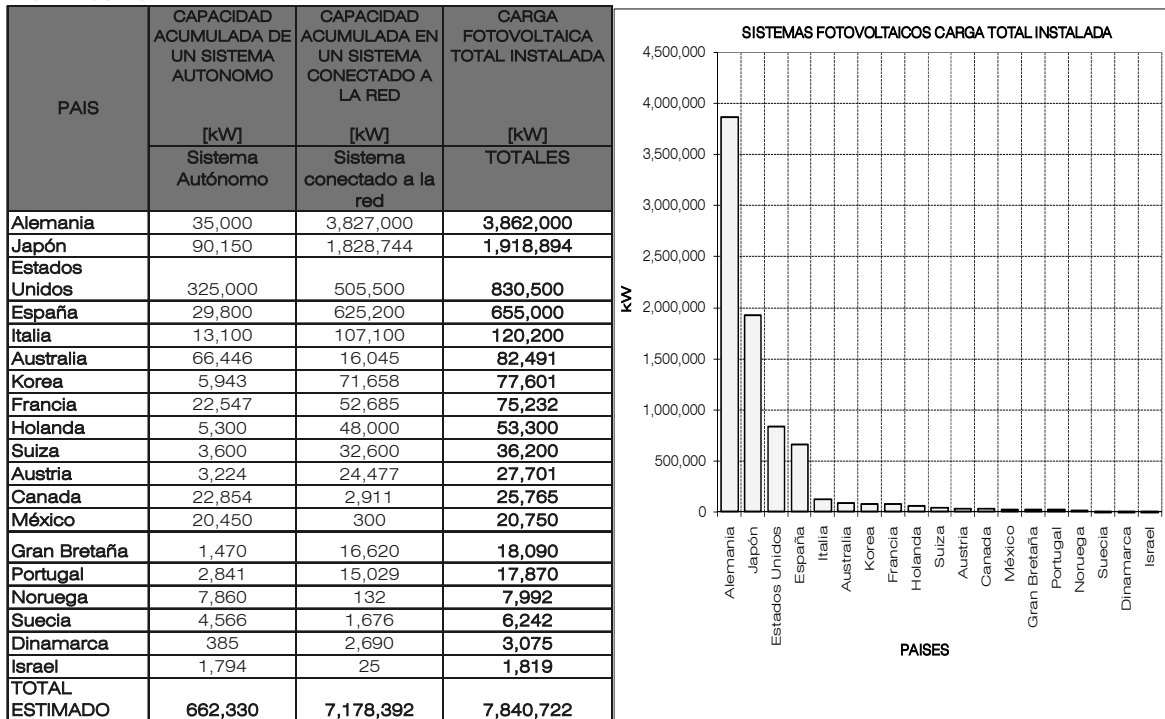
Los datos que se presentan a continuación se obtuvieron de reportes dados por la Agencia Internacional de Energía, (Internacional Energy Agency (IEA)), fundada en 1974. La IEA es un organismo autónomo dentro de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). Esta organización lleva a cabo un programa de cooperación energética entre sus 23 miembros.

La IEA cuenta con el programa de sistemas de energía fotovoltaica (IEA-PVPS, IEA Photovoltaic Power Systems Programme), que desde 1993 ha realizado diversos proyectos para la aplicación de sistemas fotovoltaicos. Dentro de este programa participan: Australia, Canadá, Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania, Israel, Italia, Japón, Corea, México, Holanda, Noruega, Portugal, España, Suecia, Suiza, el Reino Unido y los Estados Unidos.

Uno de los objetivos principales de la IEA es facilitar el intercambio y difusión de la información, sobre aspectos técnicos, económicos, ambientales y sociales relacionados con los sistemas de energía fotovoltaica. Cada año presenta un reporte de las aplicaciones fotovoltaicas en los países miembros, brindando información sobre avances y aplicaciones de la tecnología. Los últimos datos generales presentados son del 2007.

Los datos proporcionados por la IEA indican que Alemania y Japón son los países que han avanzado más en el uso de la tecnología fotovoltaica en comparación con los demás países que se encuentran dentro del programa, con una capacidad instalada de alrededor de los 3,860 MW en Alemania y 1,918 MW en Japón, seguidos por Estados Unidos con una capacidad de 830 MW equivalentes a una cuarta parte de lo instalado en Alemania, como puede verse en la tabla y la gráfica 4.1. El segundo país de Europa con mayor capacidad es España con 655 MW, México ocupa el 13° lugar con 20 MW, equivalentes al 0.5% de la energía producida en Alemania y al 2.5% de la producida en Estados Unidos.

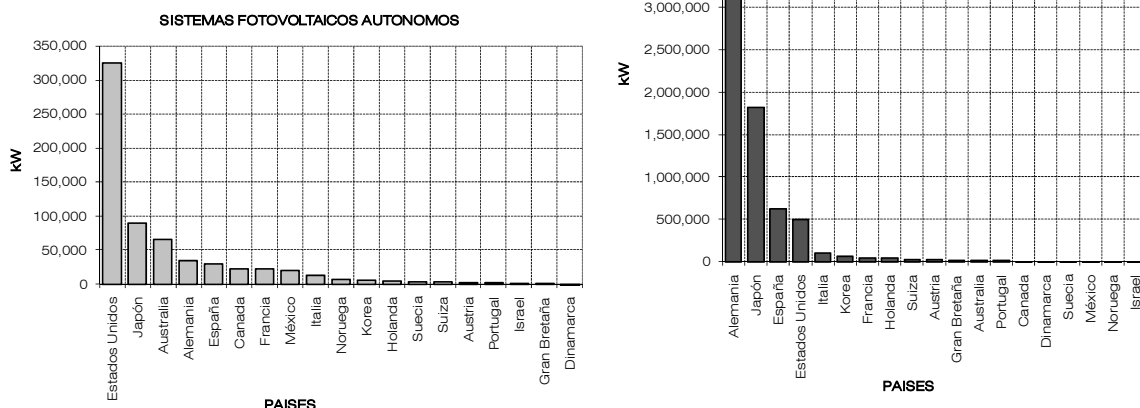
Tabla 4.1. y gráfica 4.1 Energía Fotovoltaica, Capacidad Acumulada para finales de 2007 en los países miembros de IEA



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de “Trends in Photovoltaic Applications. Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2007” Report IEA-PVPS T-1-17:2008. Disponible en <http://www.iea-pvps.org/products/download>

La carga total fotovoltaica se divide en sistemas autónomos y sistemas conectados a la red. Los países que encabezan la lista de capacidad instalada tienen un mayor número de sistemas conectados a la red, en Alemania equivalen al 99% y en Japón al 95%, en cambio en Estados Unidos ambos sistemas se encuentran más equilibrados con una pequeña mayoría para los sistemas conectados a la red con el 60% del total. El resto de los países varían en cuanto a su relación entre sistemas autónomos y los conectados a la red eléctrica. Los 5 primeros países con sistemas autónomos son: Estados Unidos, Japón, Australia, Alemania y España, por otra parte los países con mayor capacidad instalada en un sistema conectado a la red son: Alemania, Japón, España, Estados Unidos e Italia, como puede verse en las gráficas 4.2 y 4.3.

Gráficas 4.2 y 4.3. Sistemas Fotovoltaicos Autónomos y Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red, respectivamente, en países miembros de IEA



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de “Trends in Photovoltaic Applications. Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2007” Report IEA-PVPS T-1-17:2008. Disponible en <http://www.iea-pvps.org/products/download>

México ocupa el antepenúltimo lugar entre los países que se encuentran en el programa de energía fotovoltaica, en lo que se refiere a sistemas conectados a la red y el 8° en sistemas autónomos, el promedio de crecimiento anual de sistemas fotovoltaicos, de acuerdo a la IEA para México es del 10%.

Las tablas 4.2 y 4.3 presentan el crecimiento de los sistemas fotovoltaicos en los países miembros de la IEA desde 1992 hasta el 2007. En estos datos se observa que la tendencia de crecimiento en Alemania y España es muy elevada (57% y 58% respectivamente) al igual que en Japón (37%). Estados Unidos presenta un porcentaje de crecimiento de alrededor del 20%.

En la gráfica 4.4 se muestra el crecimiento de los sistemas fotovoltaicos en cada uno de los países miembros, en general su uso se encuentra en aumento, principalmente en los últimos 6 años, sin embargo, se aprecia una gran diferencia entre el desarrollo de los 2 primeros países respecto a los demás miembros. La media de los promedios anuales indica un crecimiento general del 30%. No obstante, México se encuentra entre los valores más bajos ya que aquí no se desarrolla la tecnología y se tiene que importar.

Tabla 4.2. Energía fotovoltaica instalada acumulada (MW) en países miembros de IEA

PAIS	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Australia	7.30	8.90	10.70	12.70	15.70	18.70	22.50	25.30
Austria	0.60	0.80	1.10	1.40	1.70	2.20	2.90	3.70
Canada	1.00	1.20	1.50	1.90	2.60	3.40	4.50	5.80
Suiza	4.70	5.80	6.70	7.50	8.40	9.70	11.50	13.40
Dinamarca	0.00	0.10	0.10	0.10	0.20	0.40	0.50	1.10
Alemania	5.60	8.90	12.40	17.70	27.80	41.80	53.80	69.40
España	4.00	4.60	5.70	6.50	6.90	7.10	8.00	9.10
Francia	1.80	2.10	2.40	2.90	4.40	6.10	7.60	9.10
Gran Bretaña	0.20	0.30	0.30	0.40	0.40	0.60	0.70	1.10
Israel	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.40
Italia	8.50	12.10	14.10	15.80	16.00	16.70	17.70	18.50
Japón	19.00	24.30	31.20	43.40	59.60	91.30	133.40	208.60
Korea	1.50	1.60	1.70	1.80	2.10	2.50	3.00	3.50
México	5.40	7.10	8.80	9.20	10.00	11.00	12.00	12.90
Holanda	1.30	1.60	2.00	2.40	3.30	4.00	6.50	9.20
Noruega	3.80	4.10	4.40	4.70	4.90	5.20	5.40	5.70
Portugal	0.20	0.20	0.30	0.30	0.40	0.50	0.60	0.90
Suecia	0.80	1.00	1.30	1.60	1.80	2.10	2.40	2.60
Estados Unidos	43.50	50.30	57.80	66.80	76.50	88.20	100.10	117.30
TOTALES	109.30	135.10	162.70	197	243	312	393	518

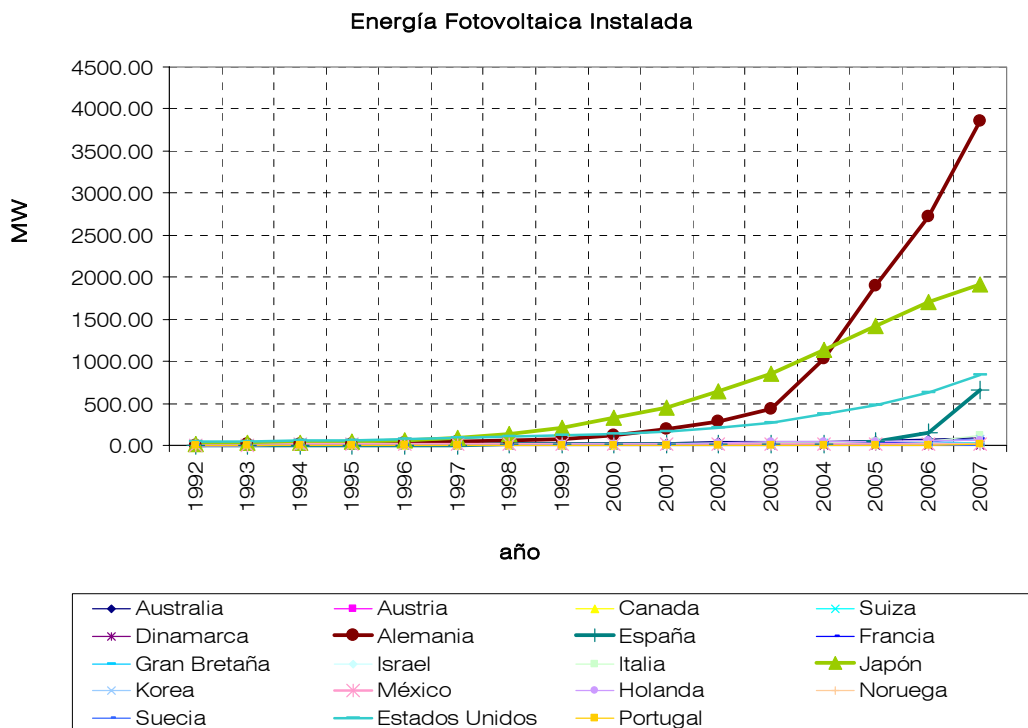
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de "Trends in Photovoltaic Applications. Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2007" Report IEA-PVPS T-1-17:2008. Disponible en <http://www.iea-pvps.org/products/download>

Tabla 4.3. Energía fotovoltaica instalada acumulada (MW) en países miembros de IEA

PAIS	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	promedio de crecimiento anual
Australia	29.20	33.60	39.10	45.60	52.30	60.60	70.30	82.50	18%
Austria	4.90	6.10	10.30	16.80	21.10	24.00	25.60	27.70	30%
Canada	7.20	8.80	10.00	11.80	13.90	16.70	20.50	25.80	24%
Suiza	15.30	17.60	19.50	21.00	23.10	27.10	29.70	36.20	15%
Dinamarca	1.50	1.50	1.60	1.90	2.30	2.70	2.90	3.10	31%
Alemania	113.70	194.60	278.00	431.00	1034.00	1897.00	2727.00	3862.00	57%
España	12.10	15.70	20.50	21.00	22.00	45.00	143.00	655.00	58%
Francia	11.30	13.90	17.20	21.10	26.00	33.00	43.90	75.20	29%
Gran Bretaña	1.90	2.70	4.10	5.90	8.20	10.90	14.30	18.10	36%
Israel	0.40	0.50	0.50	0.50	0.90	1.00	1.30	1.80	25%
Italia	19.00	20.00	22.00	26.00	30.70	37.50	50.00	120.20	22%
Japón	330.20	452.80	636.80	859.60	1132.00	1421.90	1708.50	1918.90	37%
Korea	4.00	4.80	5.40	6.40	8.50	13.50	34.70	77.60	35%
México	13.90	15.00	16.20	17.10	18.20	18.70	19.70	20.80	10%
Holanda	12.80	20.50	26.30	45.90	49.50	51.20	52.70	53.30	30%
Noruega	6.00	6.20	6.40	6.60	6.90	7.30	7.70	8.00	5%
Portugal	1.10	1.30	1.70	2.10	2.70	3.00	3.40	17.90	50%
Suecia	2.80	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.80	6.20	15%
Estados Unidos	138.80	167.80	212.20	275.20	376.00	479.00	624.00	830.50	22%
TOTALES	726	986	1331	1819	2832	4154	5584	7841	33%

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de "Trends in Photovoltaic Applications. Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2007" Report IEA-PVPS T-1-17:2008. Disponible en <http://www.iea-pvps.org/products/download>

Gráfica 4.4. Energía fotovoltaica instalada acumulada (MW) en países miembros de IEA



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de “Trends in Photovoltaic Applications. Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2007” Report IEA-PVPS T-1-17:2008. Disponible en <http://www.iea-pvps.org/products/download>

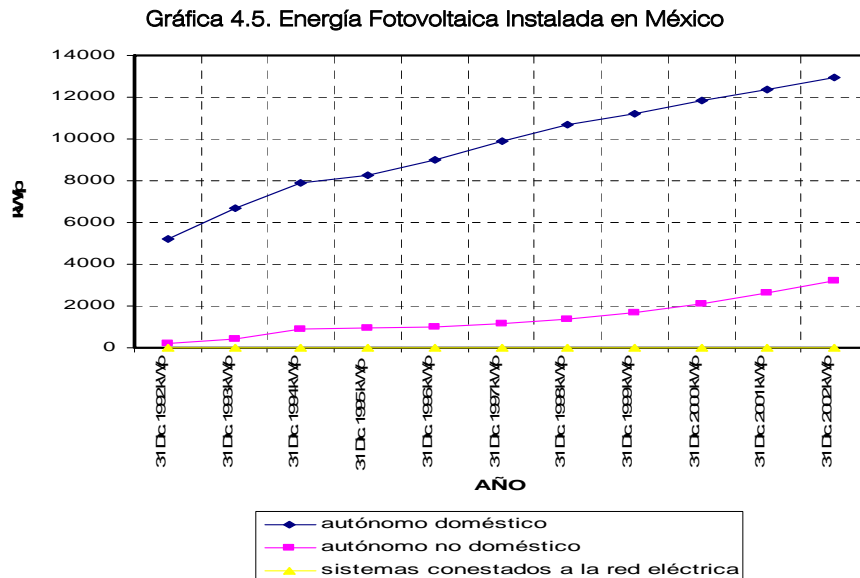
Con respecto a México el reporte más reciente es del 2002. Para finales de este año el total de energía fotovoltaica instalada en México era de 16.16 MW, 14% más que el año anterior. La mayoría de estos sistemas son autónomos para uso doméstico, se ubican en zonas rurales alejadas de la red y corresponden al 80% del total instalado, el 19.85% corresponde a sistemas autónomos no domésticos entre los que se encuentran sistemas de telecomunicación, bombeo y plataformas marinas y el 0.15% restante son sistemas conectados a la red eléctrica. El aumento del uso de la energía fotovoltaica en México puede verse en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Energía Fotovoltaica Acumulada-Instalada en México

APLICACIÓN	31 Dic. 1992	31 Dic. 1993	31 Dic. 1994	31 Dic. 1995	31 Dic. 1996	31 Dic. 1997	31 Dic. 1998	31 Dic. 1999	31 Dic. 2000	31 Dic. 2001	31 Dic. 2002
	kW/p	kW/p	kW/p	kW/p	kW/p	kW/p	kW/p	kW/p	kW/p	kW/p	kW/p
autónomo doméstico	5200	6700	7920	8270	9020	9870	10673	11228	11828	12349	12943
autónomo no doméstico	200	400	900	950	1000	1150	1347	1692	2092	2614	3208
sistemas conectados a la red eléctrica	0	0	0	0	0	2	2	2	9	9	10
TOTAL	5400	7100	8820	9220	10020	11022	12022	12922	13929	14972	16161

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del Reporte de la Encuesta Nacional de aplicaciones fotovoltaicas en México, 2002 IEA-PVPS Task 1. Disponible en <http://www.iea-pvps.org>

Puede observarse una tendencia de crecimiento en el uso de los sistemas autónomos, con un promedio anual de crecimiento del 10%. Por el contrario el uso de los sistemas conectados a la red es casi nulo y en los últimos años no presenta valores significativos como puede observarse en la gráfica 4.5.



Referencia: Elaboración propia a partir de los datos del Reporte de la Encuesta Nacional de aplicaciones fotovoltaicas en México, 2002 IEA-PVPS Task 1. Disponible en <http://www.iea-pvps.org>

La información mostrada anteriormente se refiere a los datos presentados por la IEA para el 2002 en México, el informe general del 2007 menciona que las instalaciones casi se duplicaron entre 2005 y 2006, pero para el 2007 la capacidad instalada en el país fue prácticamente la misma que en 2006. La mayoría de los sistemas fotovoltaicos instalados se encuentran en áreas rurales alejados de la red, no obstante, los sistemas conectados a la red han comenzado a crecer fomentando el interés de entidades gubernamentales e inversionistas privados gracias a que la Comisión Reguladora de Energía (CRE) hizo oficial el uso de medidores bidireccionales para fuentes de energía solar a pequeña escala para autoconsumo.

En el reporte se muestra el ejemplo del uso de sistemas fotovoltaicos en viviendas de interés social realizado por el Gobierno del Estado de Baja California con el apoyo del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IEE). El gobierno del estado busca dar una solución al problema de los altos pagos por consumo de energía eléctrica en las viviendas en Mexicali, en donde el clima extremo obliga a la utilización de sistemas de aire acondicionado. El programa tiene contemplado instalar el sistema para 220 viviendas de interés social en el Fraccionamiento Valle de las Misiones, considerando 1 KW de capacidad instalada por vivienda, el resto de la energía necesaria para el funcionamiento de los aparatos eléctricos será complementada por la energía proveniente de las instalaciones de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Cuando la energía generada sea mayor que la requerida por la vivienda (figura 4.1), el excedente de energía pasará al sistema de la CFE y será registrada (descontada) por el medidor bidireccional de energía. Esto es factible gracias a que el 27 de junio de 2007 se hizo oficial que cualquier particular o pequeño negocio podrá generar electricidad con celdas solares para autoconsumo. Si tiene excedentes, podrá subirlos a la red de la Comisión Federal de Electricidad o a Luz y Fuerza del Centro y tener un crédito a su favor, cuando por las noches utilice la energía producida por dicha red.

Figura 4.1. Sistemas Fotovoltaicos instalados en el desarrollo Valle de las Misiones



Fuente: PVPS Annual Report 2006. Disponible en <http://www.iea-pvps.org>

Desafortunadamente el modelo no resultó viable para viviendas de interés social como las de Valle de las Misiones que tienen un costo de alrededor de 178,000 pesos y al agregarles el valor del sistema, de aproximadamente 80,000 pesos, se eleva considerablemente el valor de la vivienda⁶². **Por lo tanto se considera que es conveniente para vivienda media y residencial y zonas con tarifas altas.** Así, la inversión se pagaría con los ahorros de 10 años.

Es muy importante que los gobiernos apoyen el uso de la tecnología fotovoltaica para promover su crecimiento, como ya se ha hecho en otros países.

4.3 ANÁLISIS DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Ciudad de México, Irradiación Solar

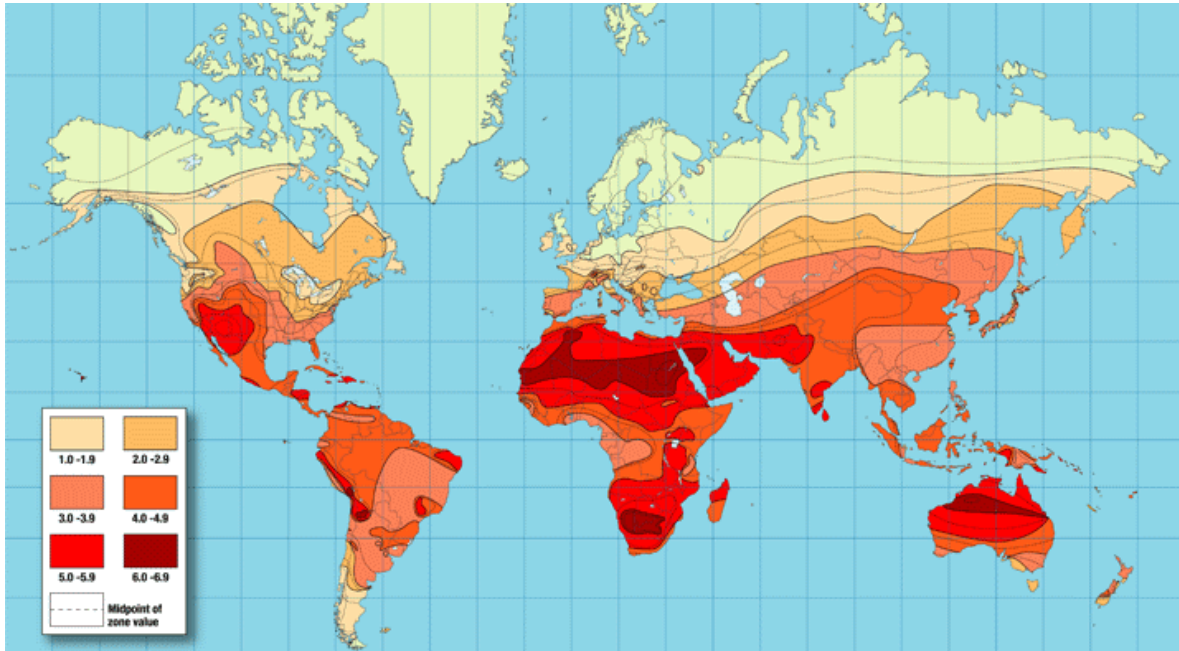
La presente investigación pretende demostrar que “si se instala un sistema solar fotovoltaico en viviendas de interés medio, en áreas urbanas, se logrará un ahorro significativo en el consumo de energía eléctrica, permitiendo la recuperación de la inversión usada para su ejecución, obteniendo beneficios energéticos, ambientales e integración arquitectónica.” Por lo que se tomó como caso de estudio a la Ciudad de México.

Para poder demostrar la hipótesis es necesario realizar un ejercicio para el cálculo de un sistema fotovoltaico en dicha zona, que servirá como base para elaborar una metodología de diseño de este tipo de instalaciones, por lo que es necesario conocer la irradiación solar de la zona.

De acuerdo al Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) las coordenadas extremas del Distrito Federal son: al norte 19°36', al sur 19°3' de latitud norte; al este 98°57', al oeste 99°22' de longitud oeste. Se ubica dentro de la franja que comprende los trópicos, que es una de las zonas de la Tierra en donde se recibe mayor irradiación solar, como puede verse en la figura 4.2, que muestra la cantidad de irradiación solar en horas, recibida por día, para una superficie inclinada en las condiciones más desfavorables.

⁶² Gobierno del Estado de Baja California. “Sistemas Fotovoltaicos conectados a la Red Eléctrica”. Disponible en <http://genc.iee.org.mx>

Figura 4.2 Mapa de Irradiación global en el mundo



Fuente: The Alternative Energy Store. Disponible en <http://howto.altenergystore.com>

Existen diversas fuentes para determinar la irradiación de la zona de estudio, una de ellas es la publicación del Instituto de Ingeniería de la UNAM "Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, en la República Mexicana" en donde la irradiación para un plano inclinado corresponde a la latitud de la localidad. En éste documento se pueden consultar mapas de isohelias de la República Mexicana para cada mes y para cada tipo de irradiación.

Dichos datos son necesarios para poder evaluar la posibilidad del uso de un sistema fotovoltaico y en su caso realizar el diseño del mismo. En este estudio se utilizaron los valores de Irradiación de 57 localidades para realizar los mapas. Para la presente investigación solo se analizarán las referencias que corresponden al Distrito Federal, los datos para ésta localidad fueron calculados utilizando las coordenadas que corresponden al aeropuerto, 19.43° Latitud Norte y 99.08° Longitud Oeste y al observatorio de Tacubaya, 19.40° Latitud Norte y 99.20° Longitud Oeste.

En base a los mapas de isohelias de dicho documento, se determino la irradiación para el Distrito Federal y se realizaron gráficas para conocer la Irradiación global tanto en una superficie horizontal como en una inclinada. Cabe recordar que la irradiación global está formada por la suma de las irradiaciones directa, difusa, y de albedo. En este caso se muestran los datos obtenidos para la irradiación global, directa y difusa, en donde la radiación difusa está compuesta por la difusa y la de albedo. Los datos obtenidos de los mapas se muestran en la tabla 4.5.

Tabla 4.5 Datos de Irradiación para el Distrito Federal

	IRRADIACIÓN GLOBAL DIARIA PROMEDIO MENSUAL EN SUPERFICIE HORIZONTAL MJ/m ² (kW/m ²)	IRRADIACIÓN DIRECTA DIARIA PROMEDIO MENSUAL EN SUPERFICIE HORIZONTAL MJ/m ² (kW/m ²)	IRRADIACIÓN DIARIA DIFUSA PROMEDIO MENSUAL EN SUPERFICIE HORIZONTAL MJ/m ² (kW/m ²)	IRRADIACIÓN GLOBAL DIARIA PROMEDIO MENSUAL EN SUPERFICIE INCLINADA MJ/m ² (kW/m ²)	IRRADIACIÓN DIRECTA DIARIA PROMEDIO MENSUAL EN SUPERFICIE INCLINADA MJ/m ² (kW/m ²)	IRRADIACIÓN DIARIA DIFUSA PROMEDIO MENSUAL EN SUPERFICIE INCLINADA MJ/m ² (kW/m ²)
Ene	15 (4.60)	10 (3.07)	5 (1.53)	18 (5.52)	12 (3.68)	5 (1.53)
Feb	18 (5.52)	11 (3.37)	6 (1.84)	20 (6.13)	13 (3.99)	6 (1.84)
Mar	20 (6.13)	12 (3.68)	7 (2.15)	20 (6.13)	13 (3.99)	7 (2.15)
Abr	20 (6.13)	13 (3.99)	8 (2.45)	21 (6.44)	13 (3.99)	7 (2.15)
may	20 (6.13)	12 (3.68)	8 (2.45)	19 (5.83)	11 (3.37)	8 (2.45)
Jun	18 (5.52)	10 (3.07)	8 (2.45)	18 (5.52)	9 (2.76)	8 (2.45)
Jul	18 (5.52)	9 (2.76)	8 (2.45)	18 (5.52)	8 (2.45)	8 (2.45)
Ago	18 (5.52)	10 (3.07)	8 (2.45)	18 (5.52)	9 (2.76)	8 (2.45)
Sep	17 (5.21)	10 (3.07)	8 (2.45)	17 (5.21)	11 (3.37)	7 (2.15)
Oct	16 (4.91)	9 (2.76)	7 (2.15)	17 (5.21)	10 (3.07)	7 (2.15)
Nov	15 (4.60)	9 (2.76)	6 (1.84)	18 (5.52)	11 (3.37)	5 (1.53)
Dic	14 (4.29)	8 (2.45)	5 (1.53)	16 (4.91)	10 (3.07)	5 (1.53)
Promedio	17.41 (5.34)	10.24 (3.14)	7 (2.15)	18.33 (5.62)	10.83(3.32)	6.75(2.07)
Mínima	14 (4.29)	8 (2.45)	5 (1.53)	16 (4.91)	8 (2.45)	5 (1.53)
Máxima	20 (6.13)	13 (3.99)	8 (2.45)	21 (6.44)	13 (3.99)	8 (2.45)

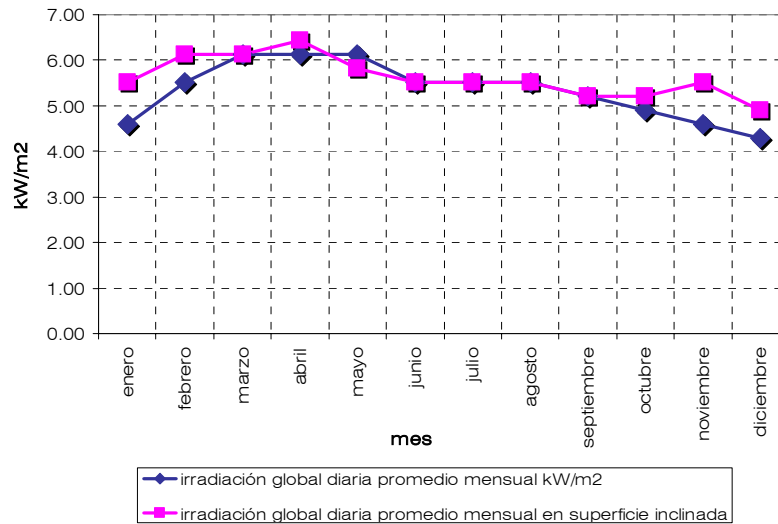
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Serie de Investigación y Desarrollo "Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal en la República Mexicana" ESTRADA-CAJIGAL RAMIREZ, Vicente y ALMANZA SALGADO, Rafael. SID/646 Instituto de Ingeniería. UNAM, Mayo 2005. ISBN: 970-32-2661-2

Los mapas presentan los datos en MJ/m², sin embargo, para el cálculo de sistemas fotovoltaicos generalmente se utilizan los kWh/m², por lo que es necesario hacer la conversión, dividiendo el valor en mega-joules entre 3.26. Ambos valores se indican en la tabla 4.5.

Los datos de la tabla 4.5 sirven de referencia para la elaboración de gráficas de los diferentes tipos de irradiación. La gráfica 4.6 muestra la irradiación global para superficie inclinada y horizontal, la irradiación es constante a lo largo del año, entre 5 y 6 kWh/m², con pequeñas variaciones en abril y mayo así como de noviembre a enero. La irradiación global diaria en superficie horizontal tiene un promedio anual igual a 5.34 kWh/m², un mínimo en diciembre de 4.29 kWh/m² y un máximo de marzo a mayo de 6.13 kWh/m².

La irradiación global diaria, en superficie inclinada presenta mayores niveles, ya que, en teoría, dicha superficie recibe los rayos solares de forma perpendicular; presenta un promedio anual de 5.62 kWh/m², un mínimo en diciembre de 4.91 kWh/m², y un máximo en abril igual a 6.44 kWh/m².

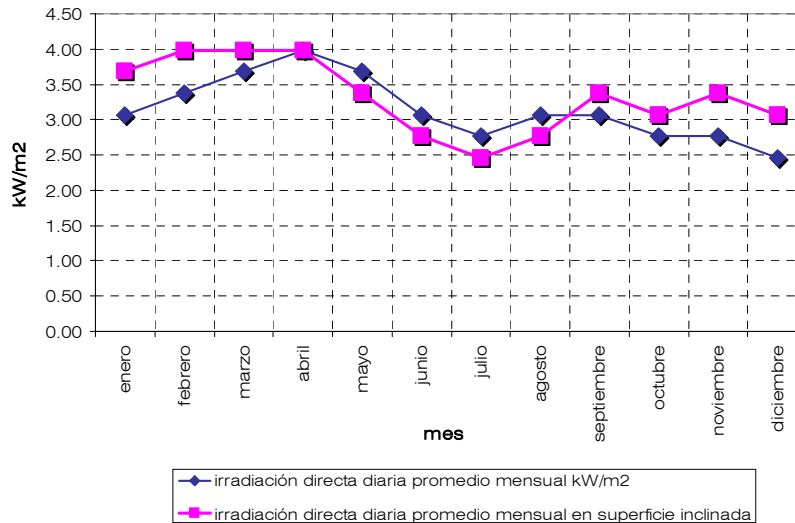
Gráfica 4.6 Irradiación Global



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Serie de Investigación y Desarrollo “Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal en la República Mexicana” ESTRADA-CAJIGAL RAMIREZ, Vicente y ALMANZA SALGADO, Rafael. SID/646 Instituto de Ingeniería. UNAM, Mayo 2005. ISBN: 970-32-2661-2

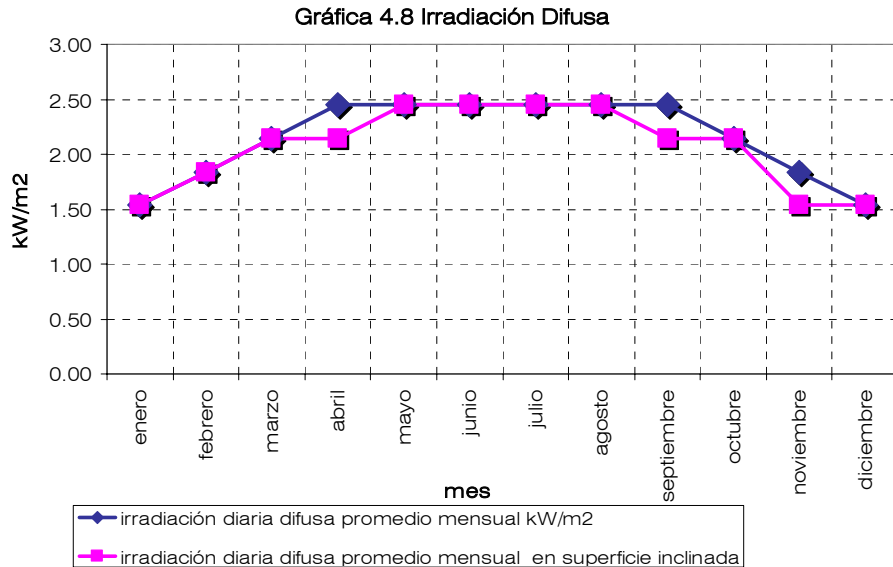
La gráfica 4.7 muestra la Irradiación Directa para superficie horizontal y superficie inclinada, dicha irradiación varía entre 4 kWh/m² y 2.5 kWh/m² durante el año. El valor promedio anual para superficie horizontal es de 3.14 kWh/m², el valor mínimo de 2.45 kWh/m² es en diciembre y el máximo, en abril, es de 3.99 kWh/m². Los valores para una superficie inclinada son menores de mayo a agosto, que corresponden a los meses de lluvias; el promedio anual es mayor al de una superficie horizontal con un valor de 3.32 kWh/m², la irradiación mínima es de 2.45 kWh/m² en julio y la máxima, de febrero a abril, es igual a 3.99 kWh/m².

Gráfica 4.7 Irradiación Directa



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Serie de Investigación y Desarrollo “Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal en la República Mexicana” ESTRADA-CAJIGAL RAMIREZ, Vicente y ALMANZA SALGADO, Rafael. SID/646 Instituto de Ingeniería. UNAM, Mayo 2005. ISBN: 970-32-2661-2

Finalmente en la gráfica 4.8 se muestra la Irradiación Difusa, para superficie horizontal e inclinada. Los valores, para ambas superficies son muy similares con una variación muy leve en abril, septiembre y noviembre, están en un rango que va de 1.5 kWh/m² a 2.5 kWh/m² durante el año. Para superficie horizontal el promedio anual es de 2.15 kWh/m² y en superficie inclinada, el promedio es menor, 2.07 kWh/m². La irradiación mínima, en diciembre y enero, es igual para las dos superficies con un valor de 1.53 kWh/m² al igual que la máxima, de mayo a agosto igual a 2.45 kWh/m².



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Serie de Investigación y Desarrollo "Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal en la República Mexicana" ESTRADA-CAJIGAL RAMIREZ, Vicente y ALMANZA SALGADO, Rafael. SID/646 Instituto de Ingeniería. UNAM, Mayo 2005.
ISBN: 970-32-2661-2

Analizando la radiación global, puede observarse que no hay demasiada variación a lo largo del año, y el valor promedio de 5.34 kWh/m² corresponde al valor que da la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE) que es de 5 kWh/m². Otra fuente que ayuda a corroborar la información, es la página sobre datos meteorológicos y energía solar de la NASA "Surface meteorology and Solar Energy" (<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>), que da información del satélite al proporcionar las coordenadas. Los datos para las coordenadas 19.4° (19°24') Latitud Norte y 99.2° (99°12') Longitud Oeste, se muestran en la tabla 4.6.

Tabla 4.6 Irradiación promedio mensual para superficie horizontal para las coordenadas 19.4° Latitud Norte, 99.2° Longitud Oeste (kWh/m²/día)

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
4.78	5.73	6.55	6.50	6.24	5.60	5.51	5.42	4.95	4.92	4.80	4.49	5.46

Fuente: "Surface meteorology and Solar Energy". Disponible en <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>

Puede verse que, aunque con pequeñas variaciones, corresponde con la información de las fuentes anteriores, estos datos son el promedio de 22 años de registros. También pueden consultarse los datos para la irradiación directa y difusa además de los datos del promedio mensual de días con cielo despejado (tabla 4.7), los meses de junio, julio, agosto y septiembre que corresponden a la época de lluvias, no tienen días despejados, sin embargo presentan un

valor de irradiación aceptable para una instalación fotovoltaica, al igual que en los meses de invierno cuando la irradiación es menor.

Tabla 4.7 Promedio mensual de días con cielo despejado

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
6	4	5	2	1	0	0	0	0	2	4	4

Fuente: "Surface meteorology and Solar Energy". Disponible en <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>

El valor de la irradiación puede obtenerse también mediante cálculos para cada día del año, de acuerdo al ejercicio realizado en el capítulo 2, que se muestra en la tabla 4.8. Puede verse la irradiancia sobre un plano con diferentes inclinaciones: GT, para los solsticios de invierno y verano en la Cd. de México, la intensidad de la irradiación en dichas superficies se encuentra entre el 91% y el 99% del total.

Tabla 4.8 Cálculo de la intensidad de irradiancia con diferentes ángulos de incidencia

INCLINACIÓN DE LA SUPERFICIE IGUAL A LA LATITUD (19.4°)	INCLINACIÓN DE LA SUPERFICIE IGUAL A LA LATITUD + 15° (34.4°)	INCLINACIÓN DE LA SUPERFICIE IGUAL A LA LATITUD - 15° (4.4°)
$GT = G_n \cos \theta$ En verano: $GT = 1000 \text{ W/m}^2 \cdot \cos (15.42)$ $GT = 964 \text{ W/m}^2$ (96%) En invierno: $GT = 1000 \text{ W/m}^2 \cdot \cos (23.45)$ $GT = 917.41 \text{ W/m}^2$ (91%)	$GT = G_n \cos \theta$ En invierno: $GT = 1000 \text{ W/m}^2 \cdot \cos (8.47)$ $GT = 989.09 \text{ W/m}^2$ (98%)	$GT = G_n \cos \theta$ En verano: $GT = 1000 \text{ W/m}^2 \cdot \cos (0.81)$ $GT = 999.90 \text{ W/m}^2$ (99%)

Fuente: Elaboración propia

El valor promedio de 5 kWh/m^2 obtenido del documento del Instituto de Ingeniería y de la CONAE, equivale al promedio de horas en un día, durante las cuales la irradiación es constante y es igual a un 1 kW/m^2 , por lo tanto se tienen 5 horas efectivas de sol al día, conocidas como Horas Sol Pico (HSP). De esta forma si se multiplica este valor por los 1000 W/m^2 y por los porcentajes obtenidos en la tabla 4.8, tenemos una irradiación mínima en el solsticio de invierno con una inclinación de 19.4° igual a 4.5 kWh/m^2 y una máxima en el solsticio de verano con una inclinación de 4.4° de 4.95 kWh/m^2 .

Los datos obtenidos mediante el cálculo pueden ser comparados y corroborados con los datos meteorológicos y de energía solar de la NASA, en donde se pueden obtener los valores de la irradiación en un punto de la superficie terrestre para superficies con diferente inclinación, horizontal (0°), vertical (90°), 19° , que corresponde a la latitud, 34° y 4° que es el resultado de sumar y restar 15° a la latitud de la zona, respectivamente; así como el ángulo de inclinación óptimo para cada mes y la irradiación obtenida con dicho ángulo (tabla 4.9).

Tabla 4.9 Promedio mensual de irradiación incidente en superficies inclinadas (kWh/m²/día)

Lat. 19.4° Long. -99.2°	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prome dio
Ángulo 0°	4.74	5.68	6.47	6.38	6.21	5.57	5.48	5.31	4.88	4.87	4.77	4.34	5.39
Ángulo 4°	5.00	5.90	6.61	6.41	6.16	5.61	5.51	5.31	4.93	5.00	5.00	4.57	5.50
Ángulo 19°	5.78	6.51	6.88	6.29	5.79	5.59	5.46	5.14	4.97	5.33	5.68	5.29	5.72
Ángulo 34°	6.23	6.76	6.77	5.86	5.14	5.30	5.15	4.73	4.77	5.38	6.05	5.71	5.65
Ángulo 90°	4.85	4.50	3.47	2.18	1.75	2.43	2.29	1.83	2.35	3.34	4.52	4.47	3.16
Ángulo óptimo	46°	36°	22°	6°	0°	10°	8°	1°	14°	29°	43°	46°	21.6°
Irradiación para el ángulo óptimo	6.34	6.77	6.88	6.41	6.21	5.63	5.52	5.31	4.98	5.40	6.11	5.82	5.94

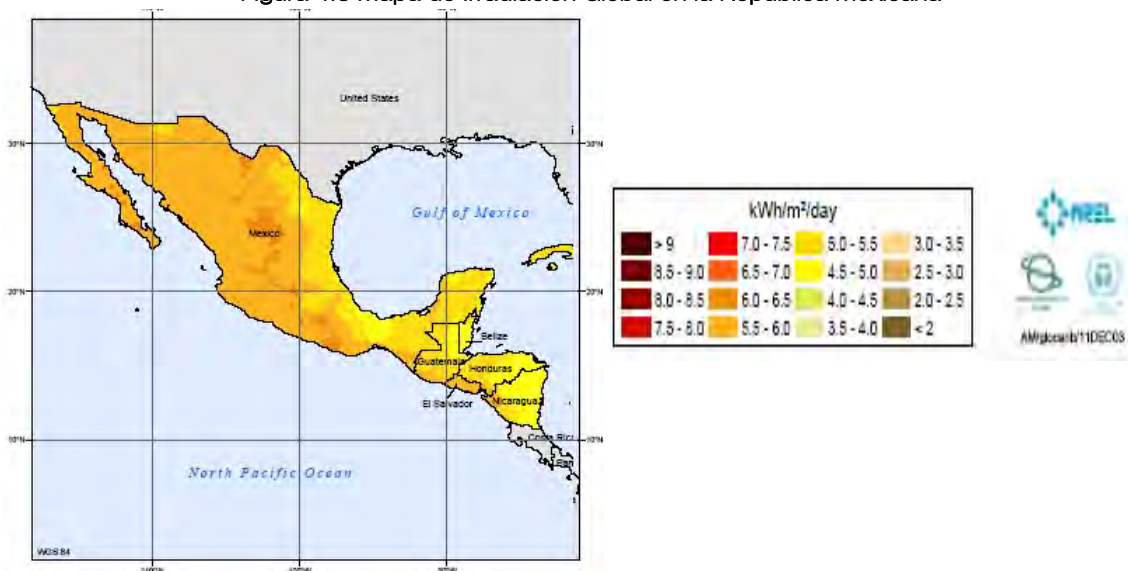
Fuente: "Surface meteorology and Solar Energy". Disponible en <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>

El promedio de irradiación más alto se obtiene con una superficie inclinada 19° con respecto a la horizontal, sin embargo, la diferencia con 4° y 34° no es significativa. De esta forma se puede decidir el ángulo más conveniente para un sistema fijo, diseñar un sistema que varíe su inclinación a lo largo del año, o escoger dos inclinaciones, una para verano y otra para invierno.

En conclusión los valores de irradiación para la Ciudad de México son altos, si se comparan con los que encontramos en Alemania, Japón y Estados Unidos, como puede verse en la figura 4.2, dichos países son los que tienen un mayor número de instalaciones fotovoltaicas en el mundo, con una irradiación menor a la de México.

Por lo tanto la irradiación en la Ciudad de México presenta valores adecuados y constantes a lo largo del año, 5 kWh/m² en promedio (figura 4.3), óptimos para la instalación de un sistema fotovoltaico, otro punto a favor es que la temperatura no es tan elevada como en otras zonas con la misma latitud, debido a la altitud con respecto al nivel del mar, lo que permite un mejor funcionamiento de las celdas fotovoltaicas.

Figura 4.3 Mapa de Irradiación Global en la República Mexicana



Fuente: National Renewable Energy Laboratory. Disponible en: <http://nrel.gov>

5. METODOLOGÍA PARA DISEÑAR UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO, DISEÑO DE UN MODELO. PROSPECTIVA

Como se ha mencionado con anterioridad, esta investigación pretende demostrar que el uso de sistemas fotovoltaicos en viviendas de interés medio es factible, para lograrlo es necesario conocer el consumo eléctrico en este tipo de viviendas. A continuación se presentan los datos que da la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.) para consumo doméstico, además de los datos obtenidos en la encuesta realizada, para corroborar la información de C.F.E. y así poder determinar el consumo promedio de una vivienda de interés medio.

Con los datos obtenidos se determinará un modelo de vivienda que permita hacer un ejercicio de cálculo y así, desarrollar una metodología de diseño que sirva de herramienta a los arquitectos para que sean capaces de dimensionar un sistema fotovoltaico de forma sencilla y eficiente. Con el cálculo del sistema se podrá determinar, también, el costo del mismo y analizar cómo influye en el costo final de la vivienda.

5.1 ANÁLISIS DE CONSUMO ELÉCTRICO EN VIVIENDAS DE INTERÉS MEDIO

5.1.1 CONSUMO DOMÉSTICO

Las tarifas de consumo doméstico de la Comisión Federal de Electricidad y de Luz y Fuerza del Centro (L.F.C.) están basadas en la cantidad de kilo-watts que se consumen en un mes. La Ciudad de México se encuentra en la región central y la energía que recibe es suministrada por L.F.C. los consumos domésticos se clasifican en tres tarifas diferentes:

1. Consumo bajo 140 kWh/mes
2. Consumo medio de 140 kWh/mes a 250 kWh/mes
3. Consumo alto superior a 250 kWh/mes

Los límites de consumo varían dependiendo de la localidad, en función de la tarifa en la que se encuentra clasificada, en general la tarifa 1 es para servicio doméstico y cambia en verano, a la Ciudad de México le corresponde la tarifa 1A, para localidades con temperatura media mínima en verano de 25 grados.

Para una vivienda de interés medio, el consumo está en el rango de los 140 kWh/mes a los 250 kWh/mes, considerando el valor máximo de **250 kWh/mes**, el consumo por día será de **8.3 kWh**. Para corroborar ésta información se realizó una encuesta dirigida a habitantes de viviendas de interés medio.

5.1.2. ENCUESTA

La encuesta se aplicó a una muestra de 27 personas, en dicha encuesta se les preguntó cuánto pagan bimestralmente por su consumo de electricidad, el número de habitantes en la vivienda, el número de focos, electrodomésticos y electrónicos. Para cada artículo se pidió especificar las horas de uso por día y los días de uso por semana. Los artículos considerados en la encuesta y los consumos de cada uno de ellos se presentan en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Consumo promedio de aparatos electrodomésticos y electrónicos

APARATO	POTENCIA	APARATO	POTENCIA
Lavadora	400 watts	Secadora	500 watts
Refrigerador 11-12 pies ³	2 kwh/día	T.V. 19-21"	70 watts
Refrigerador 14-16 pies ³	2.3 kwh/día	T.V. 24-29"	120 watts
Refrigerador 18-22 pies ³	3 kwh/día	T.V. 32-43"	250 watts
Horno de microondas	1200 watts	Estéreo	75 watts
Horno eléctrico	1000 watts	DVD	25 watts
Plancha	1000 watts	Computadora	170 watts
Licuadaora	400 watts	Bomba	1/4HP, 1/2HP, 3/4HP, 1HP

Fuente: Comisión Nacional de Energía. Ahorro de Energía en casa habitación. Disponible en: <http://www.cfe.gob.mx/es/InformacionAlCliente/ahorrodeenergia>.

Debido a que el refrigerador tiene un consumo variable a lo largo del día, los fabricantes especifican un valor de consumo anual, aquellos que tienen etiqueta de eficiencia energética tienen un valor promedio de 650 kwh/año lo que equivale a un consumo de 1800 watts/día, sin embargo debe de considerarse que aún se utilizan refrigeradores más antiguos con un consumo mayor, que puede llegar a ser el doble de uno eficiente. Para el cálculo del consumo se tomaron los valores de CFE para tres refrigeradores de diferentes tamaños, dichos valores se encuentran sobre el valor promedio de los aparatos eficientes. El consumo de la computadora considera el monitor, impresora y CPU y en el caso de la bomba un caballo de fuerza (HP) equivale a 746 watts.

De acuerdo a la encuesta, el promedio de consumo eléctrico diario de una vivienda de tipo medio es de **10,241 watts**. Para su análisis se clasificó de la siguiente forma:

Iluminación:

Esta parte de la encuesta consistió en conocer cuantos focos se tienen tanto en el exterior como en el interior y la potencia de los mismos. El promedio fue de 12 focos en el interior y 3 en el exterior con una potencia promedio de 60 watts. El 20% de los encuestados utiliza lámparas ahorradoras. La media de consumo por iluminación es de 3.97 kilo-watts al día, equivalentes al 39% del total (gráfica 5.1).

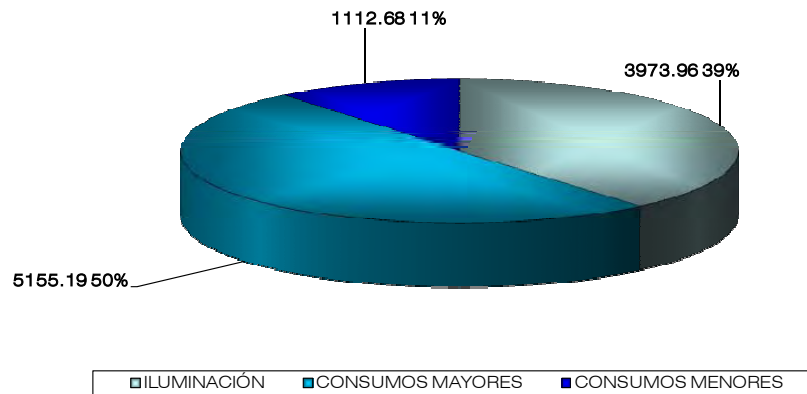
Consumos Mayores:

Los consumos mayores están representados principalmente por electrodomésticos: lavadora, secadora, refrigerador, horno de microondas, horno eléctrico y plancha, también se consideran consumos mayores a la computadora y la bomba. En este apartado se obtuvo un promedio de 5.16 kilo-watts al día, equivalentes al 50% del total (gráfica 5.1).

Consumos Menores:

En esta categoría se encuentra la licuadaora y aparatos electrónicos: televisión, estéreo y DVD. El promedio de consumo es de 1.11 kilo-watts al día, que representa el 11% del total (gráfica 5.1).

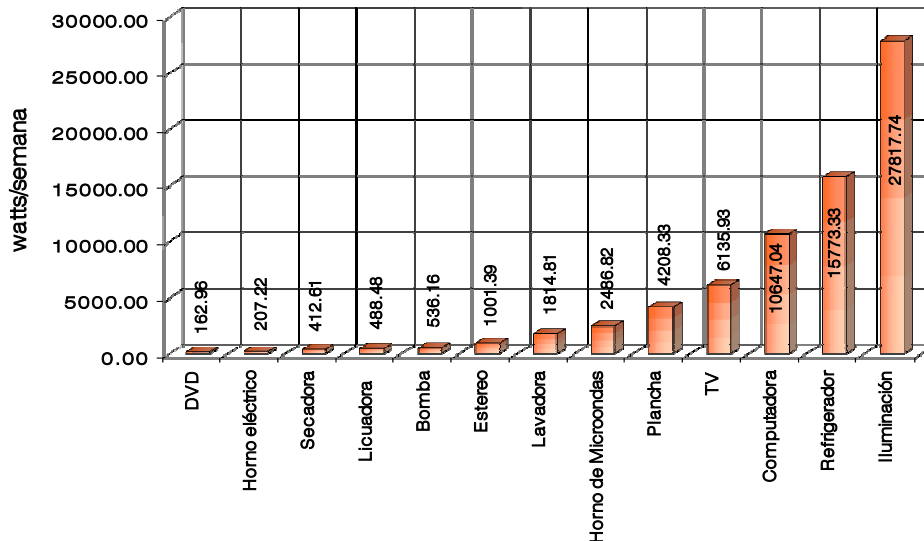
Gráfica 5.1 Distribución de consumo eléctrico en vivienda de interés medio
PORCENTAJE DE CONSUMO ELÉCTRICO



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en la encuesta.

Es importante notar que analizando individualmente los aparatos electrodomésticos y electrónicos y comparándolos con la iluminación, ésta representa el mayor consumo, seguido del refrigerador y la computadora como puede verse en la gráfica 5.2. En este caso se muestran los consumos por semana ya que existen aparatos que no se utilizan a diario.

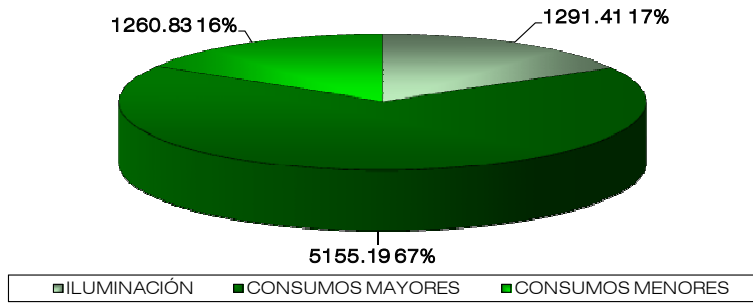
Gráfica 5.2 Consumo eléctrico por aparato



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en la encuesta.

Una forma de lograr ahorrar energía eléctrica es reducir los valores de iluminación, sustituyendo las lámparas incandescentes por fluorescentes, como se menciona anteriormente, solo un 20% de los encuestados las utiliza. Si se sustituyen los valores obtenidos en la encuesta con focos incandescentes por lámparas fluorescentes el promedio de consumo eléctrico diario disminuye **un 25%, de 10,241 watts a 7,707 watts** en este caso, la iluminación representa el 17% del total, como puede verse en la gráfica 5.3.

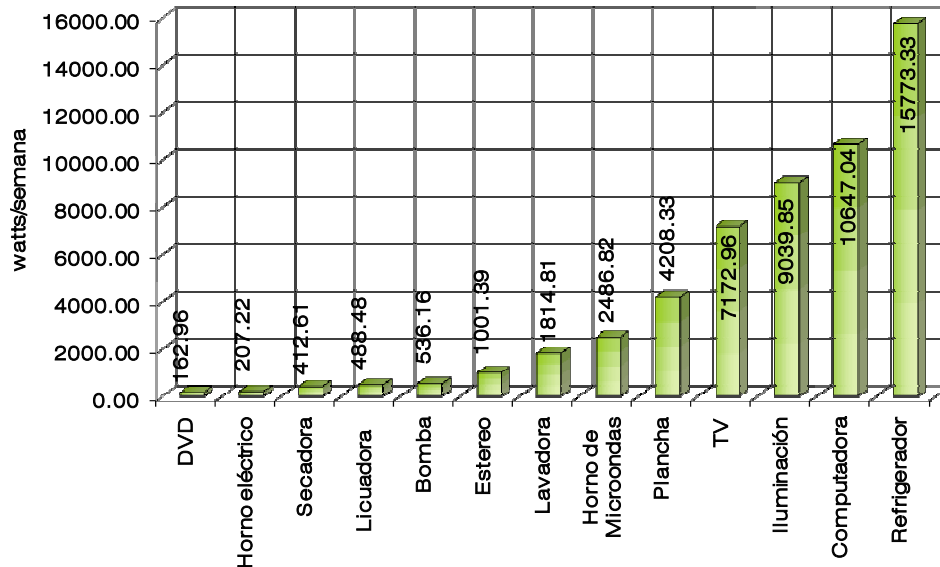
Gráfica 5.3 Distribución de consumo eléctrico en vivienda de interés medio. Lámparas ahorradoras



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en la encuesta.

En este caso el promedio diario de iluminación es de 1.29 kilo-watts, disminuyendo el consumo de ésta categoría en un 67%. En el análisis individual, la iluminación pasa de ser el principal consumo, al tercero, después del refrigerador y la computadora (gráfica 5.4).

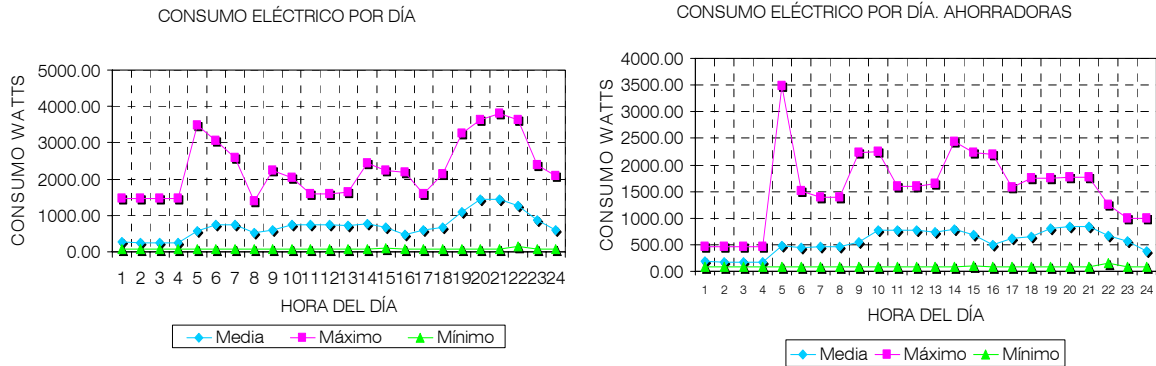
Gráfica 5.4 Consumo eléctrico por aparato. Lámparas ahorradoras



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en la encuesta.

Por otra parte las gráficas 5.5 y 5.6 muestran el consumo eléctrico a lo largo del día, la primera con el uso de lámparas incandescentes y la segunda con lámparas fluorescentes.

Gráfica 5.5 y 5.6. Comparativa de consumo eléctrico por día con lámparas incandescentes y fluorescentes



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en la encuesta.

En ambas gráficas el valor mínimo permanece constante y es el equivalente al consumo del refrigerador que se encuentra encendido todo el día.

Para el caso de lámparas incandescentes el valor máximo es de 4,000 watts aproximadamente y las horas de mayor consumo se encuentran entre las 5:00 y 7:00 de la mañana así como entre las 19:00 y 22:00 horas, el promedio del consumo máximo es de 2,280 watts. Al cambiar las lámparas incandescentes, el consumo máximo se reduce a 3,500 watts, por la mañana y se observa una disminución considerable durante la noche. Para el caso de las lámparas ahorradoras el promedio de consumo máximo es de 1,570 watts lo que equivale a un 30% menos. Durante las horas de iluminación natural no hay variación en el consumo.

La media del consumo presenta valores constantes a lo largo del día, alrededor de 1,000 watts por hora y aumenta por la noche, entre las 19:00 y 22:00 horas, con un valor aproximado de 1,700 watts. En el caso del uso de lámparas fluorescentes la media de consumo por las noches se reduce y en general no supera los 1,000 watts.

Comparado con los consumos dados por CFE, una vivienda de interés medio se encuentra dentro del consumo alto, mayor a 250 kWh/mes. La encuesta da como resultado un consumo promedio de **346.88 kWh/mes y un promedio de 4 habitantes por vivienda**, equivalente a un consumo de 86.72kWh/mes por persona y a 2.89 kWh/día por persona. Si todos utilizaran lámparas fluorescentes el consumo promedio por vivienda sería de **269.80 kWh/mes y de 67.45 kWh/mes por persona, que equivale a un ahorro del 22%**.

Los datos obtenidos son útiles para evaluar el uso de un sistema fotovoltaico en una vivienda y determinar las dimensiones del mismo. El consumo promedio por día puede ser utilizado para calcular un sistema fotovoltaico con una carga constante por hora ya que no presenta variaciones significativas a lo largo del día.

En caso de que se quisiera diseñar dicho sistema para satisfacer las necesidades de iluminación, se debe de considerar el uso lámparas fluorescentes y de baterías, ya que en las horas que se genera la electricidad no es necesaria la iluminación.

Por otra parte, si se quiere diseñar un sistema conectado a la red con el uso de un medidor bidireccional, en donde se utilice la energía generada por las celdas fotovoltaicas durante el día y la energía de la red por la noche, hay que dimensionarlo valorando las cargas que estarán

conectadas al sistema. Para un sistema de este tipo sería conveniente conectar las cargas de los consumos menores presentados en la encuesta.

5.2 DETERMINACION DEL MODELO DE VIVIENDA

Para poder hacer el cálculo del sistema es preciso desarrollar un modelo de vivienda, para esto se investigaron diferentes tipos de vivienda de interés medio existentes en el mercado, desarrollados por diferentes constructoras.

A continuación se analizan 11 viviendas diferentes, de desarrolladoras como Homes de México, Casas Ara, Casas Geo, Sare, VivelCA y Desarrolladora Homex, que presentan prototipos similares. Generalmente son viviendas de dos plantas, los locales de planta baja y planta alta se presentan en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Locales en Planta Baja y Planta Alta para Vivienda de Interés Medio

Constructora	PLANTA BAJA							PLANTA ALTA				m ²
	Estancia	Comedor	1/2 baño	Vestíbulo P.B.	Cocina	Patio de servicio	Estacionamiento	Recámara	Baño	Estudio, alcoba o sala de TV	Vestíbulo P.A.	
Homes 1	1	1	1	1	1	1	2	3	2	0	1	100
Homes 2	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	90
Homes 3	1	1	1	1	1	1	2	3	2	0	1	90
Casa Ara	1	1	1	1	1	1	2	3	1	0	1	92
Casas Geo 1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	0	1	85
Casas Geo 2	1	1	1	1	1	1	1	3	1	0	1	95
Casas Geo 3	1	1	1	1	1	1	1	3	2	0	1	112
Sare	1	1	1	1	1	1	2	2	2	0	1	119
VivelCA	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	110
Homex 1	1	1	1	1	1	1	2	3	2	0	1	103
Homex 2	1	1	1	1	1	1	2	3	2	0	1	108

Fuente: Elaboración propia.

Como puede verse todos los prototipos cuentan en planta baja, con un vestíbulo de distribución, estancia, comedor, medio baño, patio de servicio y en su mayoría dos cajones de estacionamiento.

En planta alta los locales varían entre 2 y 3 recámaras, en algunos casos la tercera recámara es remplazada por un estudio, alcoba o sala de TV, la mayoría de los prototipos cuentan con 2 baños completos y todos tienen un vestíbulo de distribución, el promedio de metros cuadrados construidos es de 100.

Por lo anterior se determinó que el prototipo de vivienda a utilizar en la investigación para el cálculo de un sistema fotovoltaico será de 100m², diseñado para 5 habitantes como máximo, con dos plantas. En planta baja se contará con los siguientes locales:

- Vestíbulo
- Estancia

- Comedor
- Cocina
- ½ baño
- Patio de servicio
- Área de estacionamiento

En planta alta con los siguientes:

- Vestíbulo
- 3 recámaras (una de ellas puede ser estudio o sala de TV)
- 2 baños

Cada uno de los locales anteriores cuenta con iluminación y con diferentes aparatos eléctricos, que representan un consumo y deben ser tomados en cuenta para el análisis del sistema fotovoltaico, así como la iluminación de las áreas exteriores.

5.3 CÁLCULO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA UNA VIVIENDA DE INTERÉS MEDIO

La primera parte del diseño se refiere a la forma convencional de calcular un sistema fotovoltaico, que puede ser instalado en la cubierta de una vivienda y a su costo estimado. Posteriormente se hace un estudio de un sistema fotovoltaico integrado a la arquitectura de la vivienda, sin considerar el costo, valorando diferentes elementos fotovoltaicos que se integran al diseño, analizando fachadas y cubierta para obtener una mayor utilidad de la energía solar.

Es importante señalar que existen programas que realizan el cálculo de los sistemas fotovoltaicos y que los proveedores que se encargan de la instalación también pueden realizar el diseño. Sin embargo, los programas no presentan datos precisos del sitio y su cálculo es aproximado, además, es conveniente que un arquitecto conozca cómo calcular y dimensionar el sistema, para poder hacer un proyecto adecuado y evaluar diferentes propuestas y diseños. Para dimensionar un sistema fotovoltaico se utilizará el modelo de vivienda determinado anteriormente.

Para calcular un sistema fotovoltaico se deben de considerar dos puntos importantes:

- a) El consumo eléctrico de la vivienda que estará conectada al sistema fotovoltaico.
- b) La irradiación solar del sitio

5.3.1 ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE LA VIVIENDA TIPO

Una vez determinado el tipo de vivienda que será analizada hay que establecer su consumo eléctrico, en corriente directa, alterna o ambas, por lo general, en México todo el consumo se da en corriente alterna a una tensión de 120-127 volts. En la tabla 5.3 se presentan los focos y aparatos eléctricos que se utilizan en cada uno de los locales de la vivienda, estos datos permitirán calcular un consumo eléctrico por día que sirva para dimensionar el sistema fotovoltaico.

Tabla 5.3 Aparatos eléctricos para vivienda de interés medio

APARATOS	INTERIOR											EXTERIOR			TOTAL
	Estancia	Comedor	1/2 baño	Vestíbulo P.B.	Cocina	Recámara 1	Recámara 2	Recámara 3 / estudio / sala T.V.	Baño 1	Baño 2	Vestíbulo P.A.	Patio de Servicio	Jardín	Estacionamiento	
Focos	3	2	1	1	1	3	3	3	1	1	1	1	1	1	23
Lavadora	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1
Secadora	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1
Refrigerador	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Horno de Microondas	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Horno Eléctrico	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Plancha	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Licuada	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Televisión	1	-	-	-	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	3
Estéreo	1	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	2
DVD	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	2
Computadora	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1
Bomba	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1

Fuente: Elaboración propia.

Para la instalación de un sistema fotovoltaico es muy importante evaluar el consumo eléctrico así como la forma de reducirlo, esto puede lograrse utilizando lámparas fluorescentes y equipos eléctricos y electrónicos eficientes, por esto en la evaluación de la vivienda se utilizan los valores más eficientes tanto para la iluminación como para los diferentes consumos. El tiempo de uso de los mismos durante el día se basa en los datos obtenidos en la encuesta y para los aparatos que no se usan a diario se da el consumo por semana (tabla 5.4). Para el cálculo se considera un día en el que todos sean utilizados.

Tabla 5.4 Consumo eficiente de lámparas, aparatos electrodomésticos y electrónicos

Aparato	Consumo/ hrs de uso/día	Aparato	Consumo/ hrs de uso/día
Lavadora	400wh / 4hrs /día-2 días a la semana	Secadora	500wh/1hr/día – 2 días a la semana
Refrigerador	1800wh / día	T.V.	70wh/3hrs/día
Horno de microondas	1200wh/0.5hrs/día	Estéreo	75wh/2hrs/día – 5 días a la semana
Horno eléctrico	1000wh/0.35hrs/día – 2 días a la semana	DVD	25wh/3hrs/día – 3 días a la semana
Plancha	1000wh/ 2hrs / día – 2 días a la semana	Computadora	300wh/6hrs/día
Licuada	400wh/0.25hrs/día – 5 días a la semana	Bomba	1/2 HP/0.35hrs/día – 5 días a la semana
Lámparas fluorescentes	20wh/4hrs/día		

Fuente: Elaboración propia a partir de Normas Oficiales Mexicanas de la Secretaría de Energía (NOM-ENER-005 y 015) y a los datos obtenidos en la encuesta.

El tiempo que permanece encendida una lámpara al día es muy variable dependiendo del local, de acuerdo a los datos obtenidos en la encuesta el promedio es de 4 horas por día para todos los locales. Para una vivienda de 5 habitantes se considera una bomba de 1/2 HP. Los datos de las tablas 5.3 y 5.4 dan como resultado el consumo en watts por día como se muestra en la tabla 5.5.

Tabla 5.5 Consumo eléctrico en vivienda de interés medio

APARATOS	INTERIOR											EXTERIOR			TOTAL
	Estancia	Cornedor	1/2 baño	Vestibulo P.B.	Cocina	Recámara 1	Recámara 2	Recámara 3 / estudio / sala T.V.	Baño 1	Baño 2	Vestibulo P.A.	Patio de Servicio	Jardín	Estacionamiento	
Focos	240	160	80	80	80	240	240	240	80	80	80	80	80	80	1840
Lavadora	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1600	-	-	1600
Secadora	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	500	-	-	500
Refrigerador	-	-	-	-	1800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1800
Horno de Microondas	-	-	-	-	600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	600
Horno Eléctrico	-	-	-	-	350	-	-	-	-	-	-	-	-	-	350
Plancha	-	-	-	-	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2000
Licuada	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100
Televisión	210	-	-	-	-	210	-	210	-	-	-	-	-	-	630
Estéreo	150	-	-	-	-	-	-	150	-	-	-	-	-	-	300
DVD	-	-	-	-	-	-	75	75	-	-	-	-	-	-	150
Computadora	-	-	-	-	-	-	-	1800	-	-	-	-	-	-	1800
Bomba	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	131	-	-	131
TOTAL	600	160	80	80	4930	450	315	2475	80	80	80	2311	80	80	11801

Fuente: Elaboración propia.

El prototipo de vivienda tiene un consumo eléctrico en corriente alterna de 11,801 watts por día, si se considera que es una construcción para 5 habitantes como máximo el consumo eléctrico diario por persona aproximado es de 2,360 watts que es un valor similar al obtenido en la encuesta. El local con mayor consumo eléctrico es la cocina, debido a los electrodomésticos, principalmente el refrigerador.

Al dividir la carga total en iluminación y fuerza, el consumo por iluminación con lámparas ahorradoras es de 1,840 watts al día equivalentes al 15.5% del total y la fuerza es de 9,961 watts.

Si se calculara una instalación fotovoltaica para el total de la demanda, se requeriría de un sistema muy grande. Por lo anterior se proponen dos casos de estudio, un sistema autónomo para la iluminación con el uso de baterías y un sistema conectado a la red mediante un medidor bidireccional, para los consumos menores.

Con los datos obtenidos del modelo descrito anteriormente, el sistema autónomo se calcula para la iluminación con lámparas ahorradoras con una demanda diaria de 1,840 watts = 1.84

kWh/día. El sistema conectado a la red se calcula con los consumos menores de 1,080 watts = 1.08 kWh/día que equivale al 9% del total y que coincide con el consumo promedio a lo largo del día obtenido en la encuesta.

5.3.2 IRRADIACIÓN SOLAR DEL SITIO

Para conocer la irradiación solar de un sitio, existen diferentes métodos, como se mencionó en el capítulo 4, mediante el cálculo, partiendo de las coordenadas geográficas del sitio o revisando los datos estadísticos de irradiación. En este caso se consideran los valores obtenidos en el capítulo 4 a partir de la publicación del Instituto de Ingeniería de la UNAM “Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, en la República Mexicana”. Los datos de la tabla 5.6 corresponden a la irradiación promedio mensual en una superficie orientada al sur con una inclinación igual a la latitud de la ciudad de México de 19.4°, por tener valores constantes durante el año, como se menciona en capítulos anteriores.

Tabla 5.6 Irradiación global para el Distrito Federal

Mes	irradiación global diaria promedio mensual en superficie inclinada kWh/m ²	Mes	irradiación global diaria promedio mensual en superficie inclinada kWh/m ²
Enero	5.52	Julio	5.52
Febrero	6.13	Agosto	5.52
Marzo	6.13	Septiembre	5.21
Abril	6.44	Octubre	5.21
Mayo	5.83	Noviembre	5.52
Junio	5.52	Diciembre	4.91

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Serie de Investigación y Desarrollo “Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal en la República Mexicana” ESTRADA-CAJIGAL RAMIREZ, Vicente y ALMANZA SALGADO, Rafael. SID/646 Instituto de Ingeniería. UNAM, Mayo 2005.

5.3.3 DISEÑO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

Una vez que se tiene el consumo eléctrico y la irradiación de la zona de estudio se puede realizar el cálculo del sistema. Los pasos que se muestran a continuación están basados en tres textos diferentes: “Tecnología Solar” de Ibáñez Plana Manel, “Fotovoltaica para profesionales. Diseño instalación y comercialización de plantas solares fotovoltaicas” de Anthony Falk, y “Conversión de la luz solar en energía eléctrica. Manual teórico y práctico sobre los sistemas fotovoltaicos” de Gasquet Héctor L. La información obtenida de esos textos se complementa para integrar una metodología de diseño.

Los pasos del diseño pueden dividirse en el cálculo de cada uno de los subsistemas:

- Captación de energía (módulos)
- Acumulación (banco de baterías)
- Regulación y adaptación del suministro eléctrico (controlador de carga e inversor de corriente)

5.3.3.1 CAPTACIÓN DE ENERGÍA

El subsistema de captación de energía está formado por los módulos fotovoltaicos, en esta parte se calcula el número de módulos y sus parámetros eléctricos. Para dimensionarlo se utiliza el valor de la demanda eléctrica para la iluminación, que es el promedio de energía eléctrica en corriente alterna (ECA) que se requiere en un día, en Wh/día:

CASO 1 (autónomo)	CASO 2 (conectado a la red)
ECA = 1.84 kWh/día	ECA = 1.08 kWh/día

Se deben de considerar las pérdidas debidas a las conducciones en los conductores y al controlador de carga es por eso que generalmente se considera un factor de seguridad del 15%. También hay que tomar en cuenta las pérdidas al transformar la corriente directa generada por el panel fotovoltaico a corriente alterna, a través del inversor (η_{inv}), el valor de eficiencia del inversor que se utiliza en el cálculo es de 90%, por lo tanto el consumo medio total diario de energía eléctrica "ET" será:

$$ET = ECA * 1.15 / \eta_{inv} =$$

CASO 1 (autónomo)	CASO 2 (conectado a la red)
ET = 1.84*1.15 / 0.90 = 2.35 kWh/día	ET = 1.08*1.15 / 0.90 = 1.38 kWh/día

Si la demanda de energía eléctrica es muy variable a lo largo del año, es conveniente evaluar el consumo de cada mes y utilizar el mes con mayor demanda. Para el caso de la ciudad de México el consumo no tiene gran variación durante el año ya que el clima no es extremo, por lo que se considera un valor constante.

Cuando se realiza una instalación para funcionar durante todo el año y generalmente para sistemas autónomos, se utilizan los datos del mes más desfavorable para garantizar la demanda de energía eléctrica durante la temporada de menor radiación.

El peor mes es aquel donde la relación entre el promedio diario de consumo eléctrico y la irradiación solar media diaria disponible (tabla 5.6) resulta más desfavorable, como se muestra en la tablas 5.7 y 5.8.

Tabla 5.7 Relación consumo / irradiación. Sistema autónomo

	MES											
	Enero	Febrero	marzo	abril	mayo	Junio	Julio	agosto	septiembre	octubre	Noviembre	diciembre
E = kWh/día	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	<u>2.35</u>
Irradiación global kWh/m ²	5.52	6.13	6.13	6.44	5.83	5.52	5.52	5.52	5.21	5.21	5.52	<u>4.91</u>
E/ irradiación global	0.43	0.38	0.38	0.37	0.40	0.43	0.43	0.43	0.45	0.45	0.43	<u>0.48</u>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.8 Relación consumo / irradiación. Sistema conectado a la red

	MES											
	enero	Febrero	marzo	abril	mayo	Junio	Julio	agosto	Septiembre	octubre	Noviembre	diciembre
E = kWh/día	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
Irradiación global kWh/m ²	5.52	6.13	6.13	6.44	5.83	5.52	5.52	5.52	5.21	5.21	5.52	4.91
E/ irradiación global	0.25	0.23	0.23	0.21	0.24	0.25	0.25	0.25	0.26	0.26	0.25	0.28

Fuente: Elaboración propia

La última fila representa la superficie que debería tener un panel fotovoltaico ideal con una eficiencia del 100%. El sistema debe dimensionarse para cubrir las necesidades del mes más desfavorable, es decir el que necesita mayor área, en este caso el valor máximo lo encontramos en el mes de diciembre, por lo tanto serán los datos utilizados para el diseño.

Para dimensionar el arreglo fotovoltaico se debe de conocer la potencia pico (Wp) de un módulo, es decir, la potencia producida en condiciones estándar, que suponen una radiación de 1000 W/m² y una temperatura de 25° C. La energía que producirá el panel será igual a la potencia por las horas sol pico (HSP) que es igual a la irradiación promedio de un día.

El módulo fotovoltaico utilizado para el cálculo es distribuido por ERDM-Solar, el modelo ERDMQM6-135/12 tiene las siguientes especificaciones:

Potencia pico	(Wp)	135.00 W
Voltaje nominal	(V)	12.00 V
Corriente a potencia máx.	(Imp)	7.54 A
Voltaje a potencia máx	(Vmp)	17.90 V
Corriente a cortocircuito	(Isc)	8.26 A
Voltaje a circuito abierto	(Voc)	22.20 V
Dimensiones	(m)	0.67x1.48

Por lo tanto si se multiplica la irradiación de diciembre, correspondiente al mes más desfavorable, por la potencia pico del módulo fotovoltaico se obtiene la energía producida por un módulo en un día:

$$\text{HSP} * \text{Wp} = \text{Wh/día} = \text{Energía generada por un módulo}$$

$$4.91 \text{ kWh / día} * 0.135 \text{ kW} = 0.663 \text{ kWh/día}$$

Con este dato se puede calcular el número de módulos necesarios, utilizando el valor promedio de consumos de energía eléctrica de los dos casos de estudio, multiplicado por un factor de seguridad de 1.1 debido a que puede haber pérdidas si trabajan a temperaturas mayores de 25° C y por el desgaste de los módulos con el paso del tiempo, el resultado se divide entre la energía producida por un módulo, lo anterior da como resultado la siguiente expresión:

Número de módulos = $1.1E / (HSP * Wp)$

CASO 1 (autónomo)	CASO 2 (conectado a la red)
No. mód. = $1.1(2.35 \text{ kWh/día}) / 0.663 \text{ kWh/día}$ = $2.59 / 0.712 = 3.90 \approx 4$ módulos	No. mód. = $1.1(1.38 \text{ kWh/día}) / 0.663 \text{ kWh/día}$ = $2.59 / 0.712 = 2.29 \approx 3$ módulos

Una vez obtenido el número de módulos debe elegirse una tensión de trabajo, esta tensión debe ser la misma para los módulos, el inversor y las baterías. El voltaje de trabajo determina la forma en que se conectarán los paneles y las baterías, esta tensión puede ser de 12V, 24V o 48V dependiendo del modelo del inversor. La tensión nominal para un módulo fotovoltaico es de 12V, en este caso se considerará una tensión de trabajo de 24V para el caso 1 y de 12V para el sistema conectado a la red, con este dato es posible calcular el número de módulos conectados en serie y obtener el voltaje de salida:

Número de módulos en serie = Voltaje del sistema / voltaje del modulo

CASO 1 (autónomo)	CASO 2 (conectado a la red)
No. mód. en serie = $24 / 12 = 2$ módulos en serie	No. mód. en serie = $12 / 12 = 1$ módulos en serie

A continuación se calcula la conexión de módulos en paralelo utilizando el número de módulos calculado anteriormente:

Número de módulos en paralelo = Número de módulos / Número de módulos en serie

CASO 1 (autónomo)	CASO 2 (conectado a la red)
No. mód. en paralelo = $4 / 2 = 2$	No. mód. en paralelo = $3 / 1 = 3$

Los datos anteriores sirven para corregir el número original de módulos multiplicando los módulos en serie por los módulos en paralelo, es este caso no hay cambio y se conservan los módulos originales.

Cada módulo tiene un área de 0.99m^2 , el área que se requiere para la instalación de los paneles fotovoltaicos es de 3.96m^2 para el caso 1 y de 2.97m^2 para el caso 2. Las viviendas de interés medio estudiadas tienen en promedio 100m^2 construidos en dos niveles, la planta de azotea tiene una superficie aproximada de 50m^2 , por lo tanto los paneles fotovoltaicos solo ocupan aproximadamente el 8% del área de azotea.

Una vez determinado el número de módulos se pueden obtener los parámetros eléctricos del subsistema de captación, cabe recordar que para los módulos conectados en serie se suman los voltajes y para los que están conectados en paralelo se suman las corrientes.

CASO 1 (autónomo)	CASO 2 (conectado a la red)
Potencia pico (Wp) No. total de paneles x Wp=4 x 135 W=540 W	Potencia pico (Wp) No. total de paneles x Wp=3 x 135 W=405 W
Corriente a potencia máxima (Imp) Imp x No. de módulos en paralelo=7.54A x2 = 15.08 A	Corriente a potencia máxima (Imp) Imp x No. de módulos en paralelo=7.54A x3 = 22.62 A
Corriente de corto circuito (Isc) Isc x No. de módulos en paralelo = 8.26 x 2 = 16.52 A	Corriente de corto circuito (Isc) Isc x No. de módulos en paralelo = 8.26 x 3 = 24.78 A
Voltaje nominal de salida (V) Voltaje nominal x No. de módulos en serie = 12V x 2 = 24 V	Voltaje nominal de salida (V) Voltaje nominal x No. de módulos en serie = 12V x 1 = 12 V
Voltaje a potencia máxima (Vmp) Vmp x No. de módulos en serie = 17.9 x 2 = 35.8 V	Voltaje a potencia máxima (Vmp) Vmp x No. de módulos en serie = 17.9 x 1 = 17.9 V
Voltaje a circuito abierto (Voc) Voc x No. de módulos en serie = 22.2 x 2 = 44.4 V	Voltaje a circuito abierto (Voc) Voc x No. de módulos en serie = 22.2 x 1 = 22.2 V

5.3.3.2 ACUMULACION

El subsistema de acumulación solo se calcula para el sistema autónomo, ya que en el caso 2 la energía necesaria durante las noches o en periodos de baja irradiación se toma de la red eléctrica. Para el cálculo son necesarios los siguientes parámetros:

- Profundidad máxima de descarga. En este caso se consideran baterías de plomo-ácido con una profundidad de descarga de **80%**
- Tensión o voltaje de trabajo. Este valor es igual al voltaje de salida de los módulos conectados en serie: **24V**.
- Voltaje nominal de cada uno de los elementos de almacenamiento: **8V**.
- Días de autonomía, es decir, los días sin sol o baja irradiación, obtenidos de los datos meteorológicos y de energía solar de la NASA (tabla 5.9), el promedio anual de días sin sol es de **4**.
- Demanda de energía diaria, sin considerar las pérdidas debidas a al inversor de corriente y sin el factor de seguridad del 10% con el que se cálculo la potencia de los módulos, el valor de demanda de energía es de **1.84kWh/día**.

Tabla 5.9 Promedio mensual de días nublados

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
6.35	3.02	4.96	3.36	3.92	4.39	3.26	5.94	6.00	4.28	3.67	1.93	3.75

Fuente: "Surface meteorology and Solar Energy". Disponible en <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>

Debe de considerarse el mes con el máximo consumo. La capacidad total de las baterías puede obtenerse mediante la siguiente expresión:

Capacidad total = 1.1 • [Número de días de autonomía • Energía eléctrica solicitada (Wh/día)] / [profundidad máxima de descarga • tensión de trabajo]

El 1.1 equivale a un factor de seguridad del 10% considerando la eficiencia de las baterías de 90%. Por lo tanto:

Capacidad total = 1.1 • (4 • 1840) / (0.8 • 24) = **421.67 Ah**

Es conveniente utilizar baterías con una capacidad ligeramente mayor a la requerida. La empresa ERDM-Solar cuenta con las baterías de la capacidad adecuada con las siguientes características:

- Bateria Surrete de Ciclo profundo, serie 4000, modelo 8HHG-31PS
- Tensión nominal: 8V
- Capacidad: 430 Ah
- Dimensiones: 69x20x30 cm.

La manera más recomendable para conectar las baterías es en serie, la tensión nominal del sistema propuesto es de 24V, por lo tanto se necesitan 3 unidades conectadas en serie. Deben ubicarse en un lugar frío y seco con ventilación natural de preferencia, de acuerdo al tamaño del modelo, ocupan un área de medio metro cuadrado.

5.3.3.3 REGULACION Y ADAPTACION AL SUMINISTRO ELÉCTRICO

El subsistema de regulación y adaptación al suministro eléctrico esta formado por el inversor de corriente y el controlador de carga.

CASO 1

Los parámetros eléctricos para el inversor son: potencia del inversor que debe ser igual o mayor a la demanda de energía de 1840W; voltaje nominal de entrada que es igual a la tensión de trabajo del sistema de 24V; tensión de salida, igual a la utilizada por los receptores de la carga en corriente alterna de 120-127V; debe aceptar la corriente de entrada que se obtiene dividiendo la demanda entre la tensión de trabajo: $1840/24 = 76.77A$ y la corriente de salida será la demanda entre el voltaje de salida: $1840/120 = 15.33A$. Un inversor que se adapta a estas condiciones es el de la marca Outback modelo Fx2524T con las siguientes características:

- Eficiencia: 92%
- Voltaje de admisión: 24V
- Potencia continua: 2500W
- Voltaje de salida: 120V

El controlador de carga debe de manejar como mínimo la máxima corriente de generación de 15.08 A, así como la corriente de corto circuito de los paneles de 16.52A. El voltaje de trabajo del controlador de carga esta dado por el voltaje de los paneles conectados en serie de 24V, como mínimo y por el voltaje de circuito abierto de 44.4V como máximo. Para el ejemplo se propone el regulador de la marca Steca, modelo PR2020 con las siguientes características:

- Tensión de trabajo: 24V
- Corriente: 20A
- Tensión máxima de entrada: 47V

En resumen el sistema fotovoltaico diseñado esta formado por 4 módulos de 135W, un regulador de carga de 24V y 20A, un banco de baterías de 3 unidades conectadas en serie de 8V/430Ah y un inversor de corriente de 2500W (24V)

CASO 2

Para este caso se requiere de un inversor para conexión en paralelo con la red, que dirija la energía producida por los módulos a la vivienda, que tome la energía necesaria de la red cuando no se produzca energía por el sistema fotovoltaico y que envíe los excedentes de electricidad a la red. Los parámetros eléctricos para el inversor son: potencia del inversor que debe ser igual o mayor a la demanda de energía de 1080W; voltaje nominal de entrada que es igual a la tensión de trabajo del sistema de 12V y que soporte el voltaje a circuito abierto del sistema de 22.2V; tensión de salida, igual a la utilizada por los receptores de la carga en corriente alterna de 120-127V; debe aceptar la corriente de corto circuito de 24.78A y la corriente de salida, que será la demanda entre el voltaje de salida: $1080/120 = 9A$. Un inversor que se adapta a estas condiciones es el de la marca PVPowered modelo PVP1100 con las siguientes características:

- Eficiencia: 92%
- Voltaje de admisión máximo: 150V
- Voltaje máximo a circuito abierto: 500V
- Potencia continua: 1100W
- Voltaje de salida: 120V
- Corriente de corto circuito: 26A
- Corriente máxima de salida: 10A

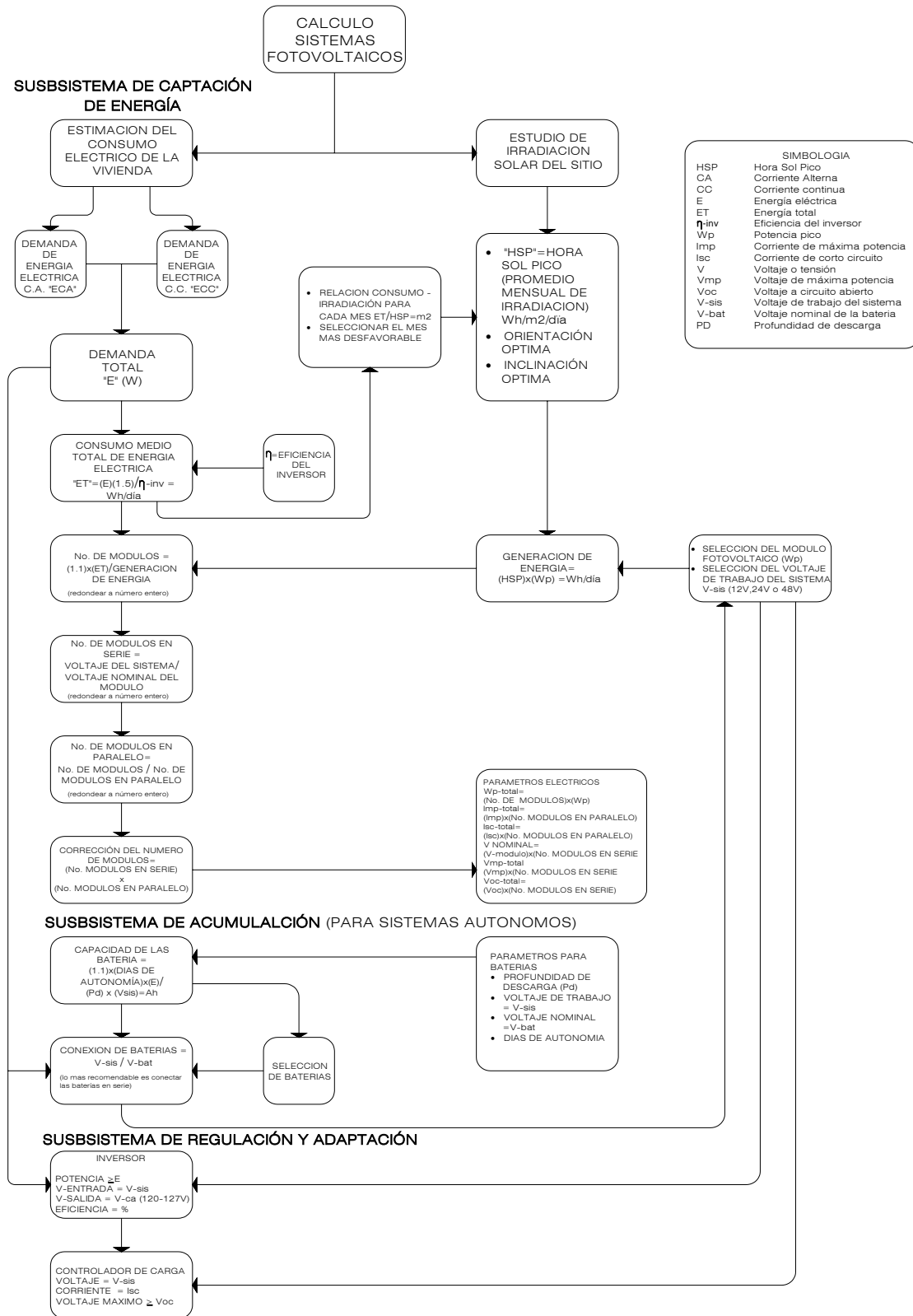
Los sistemas conectados a la red no requieren del controlador de carga, ya que éste se encarga de controlar la carga que reciben las baterías. El inversor administra la energía del sistema fotovoltaico hacia la red o la vivienda así como la electricidad que tenga que ser tomada de la red.

En resumen el sistema fotovoltaico diseñado está formado por 3 módulos de 135W y un inversor de corriente de 1100W (12V).

El sistema conectado a la red puede tener una batería de respaldo en caso de fallas en el suministro eléctrico, en este caso si se requeriría del controlador de carga.

Los pasos anteriores constituyen una metodología de diseño de sistemas fotovoltaicos mediante un desarrollo sencillo y comprensible. El proceso de diseño se resume en la figura 5.1

Figura 5.1 Diagrama para el diseño de Sistemas Fotovoltaicos



Fuente: Elaboración propia

5.4 ANÁLISIS DE COSTOS

5.4.1 EVALUACIÓN DEL COSTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA EL MODELO DE VIVIENDA

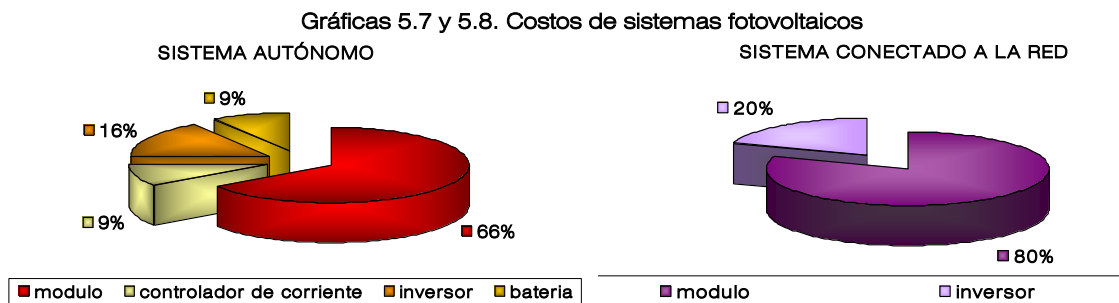
Para estimar el costo de los sistemas fotovoltaicos se realizó un estudio de mercado. Se analizaron las cotizaciones de cuatro distribuidores, para un sistema con un consumo de 1000 watts por día, con los datos obtenidos se determinó que el valor estimado promedio de un kilowatt para sistemas autónomos es de \$36,000.00 y para sistemas conectados a la red de \$29,300⁶³, la aportación de cada uno de los elementos en el costo total se muestra en la tabla 5.10.

Tabla 5.10 Costos estimados para sistemas fotovoltaicos

SISTEMA AUTÓNOMO			SISTEMA CONECTADO A LA RED		
ELEMENTO	COSTO	PORCENTAJE	ELEMENTO	COSTO	PORCENTAJE
Módulos fotovoltaico	\$ 23,459.00	65.16%	Módulos fotovoltaico	\$ 23,459.00	80.17%
Controlador de carga	\$ 3,399.00	9.44%	Inversor	\$ 5,804.00	19.83%
Inversor	\$ 5,804.00	16.12%			
Batería	\$ 3,338.00	9.27%	TOTALES	\$ 29,263.00	100%
TOTALES	\$ 36,000.00	100%			

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de SYSCOM, ERDM SOLAR, ALTERNATIVA SOLAR Y ARIAN SOLAR

En ambos sistemas, los módulos fotovoltaicos constituyen el mayor costo, principalmente por que las celdas solares no se fabrican en México, existen empresas que importan las celdas y ensamblan los módulos y otras que importan el módulo completo. En segundo lugar se encuentra el inversor de corriente, su costo varía dependiendo de la capacidad del sistema y de si es importado o no. Las baterías y el controlador de carga equivalen cada uno al 10% del total, su costo esta directamente relacionado con la capacidad del sistema, el porcentaje correspondiente a los valores de la batería y el controlador de carga representan la diferencia entre los dos sistemas (gráficas 5.7 y 5.8). La estimación no considera la instalación, que puede elevar el costo hasta un 20%⁶⁴. En caso de que todos los elementos fueran importados el valor de la inversión puede elevarse hasta el doble.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de SYSCOM, ERDM SOLAR, ALTERNATIVA SOLAR Y ARIAN SOLAR

⁶³ Costos estimados para Abril de 2009, tipo de cambio: 1USD = \$14.00 M.N

⁶⁴ Solarbuzz, Portal to the World of Solar Energy. Disponible en <http://www.solarbuzz.com/>

En base a los datos obtenidos se estimó el costo para los casos de estudio del modelo de vivienda con un sistema autónomo y un sistema conectado a la red (tabla 5.11).

Tabla 5.11 Costos estimados para el modelo de vivienda

SISTEMA AUTÓNOMO (2.35 kWh/día)			SISTEMA CONECTADO A LA RED (1.38 kWh/día)		
ELEMENTO	COSTO	PORCENTAJE	ELEMENTO	COSTO	PORCENTAJE
Módulos fotovoltaico	\$ 55,130.00	65.41%	Módulos fotovoltaico	\$ 41,350.00	82.29%
Controlador de carga	\$ 4,100.00	4.86%	Inversor	\$ 8,900.00	17.71%
Inversor	\$ 13,850.00	16.43%			
Batería	\$ 11,200.00	13.29%	TOTALES	\$ 50,250.00	100%
TOTALES	\$ 84,280.00	100%			

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de SYSCOM, ERDM SOLAR, ALTERNATIVA SOLAR Y ARIAN SOLAR

En el modelo de vivienda se considera el uso de lámparas fluorescentes de 20W en lugar de lámparas incandescentes de 100W lo que representa un ahorro de 80% en iluminación, gracias a ello se tiene un consumo al día de 11.8kWh y al mes de 354kWh, en lugar de 19.16kWh/día y 574.80kWh/mes que se consumirían con las lámparas incandescentes. El ahorro mensual se determina de acuerdo a la tarifa 1A de C.F.E. que establece los cargos por energía consumida, para consumos mayores a 150 kilowatts-hora de la siguiente forma:

- Consumo básico \$ 0.589 por cada uno de los primeros 100 kilowatts-hora.
- Consumo intermedio \$ 0.884 por cada uno de los siguientes 50 kilowatts-hora
- Consumo excedente \$ 2.337 por cada kilowatt-hora adicional a los anteriores.

El ahorro obtenido con el uso de lámparas fluorescentes y celdas fotovoltaicas se muestra en la tabla 5.12.

Tabla 5.12 Ahorros estimados para el modelo de vivienda

CONSUMO CON LÁMPARAS INCANDESCENTES	CONSUMO CON LÁMPARAS FLUORESCENTES	CASO 1 CONSUMO CON SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO	CASO 2 CONSUMO CON SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED
19.16kWh/día	11.8kWh/día	9.96kWh/día	10.42kWh/día
574.80kWh/mes	354kWh/ mes	298.80kWh/ mes	312.63kWh/ mes
CARGO MENSUAL DE ACUERDO A TARIFAS DE C.F.E.			
100 x 0.589 = \$ 58.90 50 x 0.884 = \$ 44.20 424.8 x 2.33 = \$ 992.75 \$ 1095.85	100 x 0.589 = \$ 58.90 50 x 0.884 = \$ 44.20 204 x 2.33 = \$ 476.75 \$ 579.85	100 x 0.589 = \$ 58.90 50 x 0.884 = \$ 44.20 148.8 x 2.33 = \$ 347.75 \$ 450.85	100 x 0.589 = \$ 58.90 50 x 0.884 = \$ 44.20 162.6 x 2.33 = \$ 380.00 \$ 483.10
AHORRO EN RELACIÓN AL USO DE LÁMPARAS INCANDESCENTES			
\$ 0.00 / mes	\$ 516.00 (47%) / mes	\$ 645.00 (59%) / mes	\$ 612.70 (56%) / mes
\$ 0.00 / año	\$ 6,192.00 / año	\$ 7,740.00 / año	\$ 7,352.00 / año

Fuente: Elaboración propia

Para determinar el tiempo de recuperación de la inversión se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Recuperación} = \frac{\text{Inversión neta}}{\text{Beneficios netos generados por año}}$$

CASO 1 (autónomo)	CASO 2 (conectado a la red)
Recuperación = \$ 84,280.00 / \$ 7,740.00 = 10.97 ≈ 11 años	Recuperación = \$ 50,250.00 / \$ 7,352.00 = 6.83 ≈ 7 años

El tiempo de recuperación en general es largo, para el caso 1 es de 11 años y de 7 años para el caso 2, sin considerar aumentos en las tarifas y los gastos de mantenimiento que requieren las baterías. La inversión se recupera antes de que termine el tiempo de vida del sistema, que es de 20 a 25 años, sin embargo representa un gasto elevado, principalmente para los sistemas autónomos. El sistema conectado a la red requiere de menos inversión y muestra un tiempo de recuperación menor, presentándose como la opción más factible económicamente.

Debido a los costos actuales del sistema su instalación en viviendas de interés medio es más factible que en viviendas de interés social. Los créditos que se otorgan para viviendas de interés social son como máximo 180 veces el salario mínimo mensual, lo que equivale en el Distrito Federal a \$295,900.00⁶⁵, aproximadamente, y la instalación de un sistema fotovoltaico incrementaría el valor de la vivienda entre un 17% y un 25%, dificultando la autorización de créditos para este tipo de edificaciones.

Para una vivienda como la estudiada en éste capítulo se considera un costo por metro cuadrado de construcción de \$6,475.00⁶⁶ de acuerdo al catalogo BIMSA que comprende costos indirectos, utilidad, costo de proyecto y licencias. Por lo tanto el valor estimado de la vivienda estudiada será de \$647,500.00 sin considerar el sistema fotovoltaico. El uso del sistema autónomo eleva el valor un 13% y el sistema conectado a la red lo incrementa un 7.7%.

Con estos incrementos, el valor de la vivienda aún es considerado por las instituciones bancarias para el otorgamiento de créditos, con la ventaja de que se obtiene un ahorro en el consumo eléctrico.

5.4.2 COSTOS DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

La industria de la energía solar utiliza el watt-pico, para medir el costo de los módulos fotovoltaicos, este costo se da generalmente en dólares. El watt-pico es la potencia de salida de un módulo fotovoltaico con una irradiación de 1000 watts/m² a una temperatura de 25° C. Para medir el costo se utilizan paneles con potencias mayores a 125W. El costo ha caído de 27 dólares por watt-pico en 1982 a 4 dólares por watt-pico en 2009. El módulo representa entre el 40% y el 60% del costo total del sistema dependiendo del tipo de instalación.

Una manera de evaluar los costos de los módulos fotovoltaicos, es evaluar su evolución en Japón, que es considerado líder en el mercado fotovoltaico, ya que ahí se encuentra la mayoría de las empresas productoras, además de tener el mayor número de sistemas conectados a la red, gracias a los programas gubernamentales⁶⁷.

En la grafica 5.9 puede verse que de 1993 a 1997 los precios bajaron considerablemente y que para 2002 la tendencia continúa a la baja aunque a un ritmo menor. La gráfica 5.10 muestra

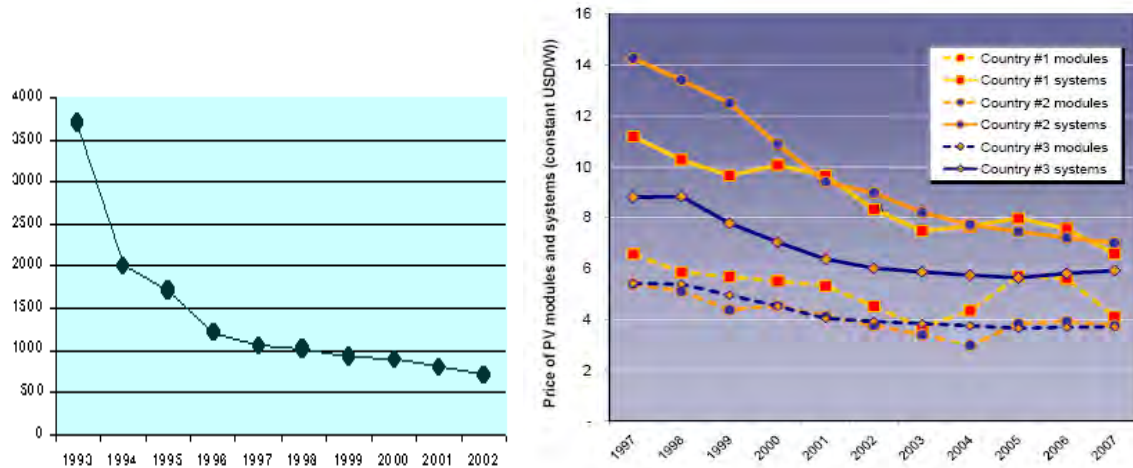
⁶⁵ Valor del salario mínimo = 54.80 pesos. Marzo 2009

⁶⁶ Valor estimado para Marzo de 2009

⁶⁷ Solarbuzz, Portal to the World of Solar Energy. Disponible en <http://www.solarbuzz.com>

los datos de tres países miembros de la International Energy Agency (IEA), para costos de módulos y sistemas en USD/W, en el período de 1997 a 2007. Los módulos han bajado de 7 USD/W a 4 USD/W y los sistemas han reducido su costo prácticamente a la mitad en 10 años pasando de 14 USD/W en 1997 a 7 USD/W en el 2007.

Gráfica 5.9 a la izquierda, costo de sistemas fotovoltaicos instalados en Japón (yen/watt). A la derecha gráfica 5.10 evolución de los precios de sistemas fotovoltaicos a pequeña escala en países de la IEA



Fuente: Solarbuzz, Portal to the World of Solar Energy. Disponible en <http://www.solarbuzz.com> y "Evolution of prices and systems in selected countries in reporting year". Disponible en <http://www.iea-pvps.org>

De acuerdo a las estadísticas de la compañía Solarbuzz dedicada a la investigación y consultoría sobre energía solar, para el mes de abril de 2009 el precio del watt-pico estaba alrededor de 4.75USD, los costos más bajos de los módulos fotovoltaicos que presenta son:

- Módulo monocristalino 3.35 USD / watt-pico
- Módulo policristalino 3.41 USD / watt-pico
- Película delgada 2.49 USD / watt-pico

Para convertir el costo de un kilowatt-pico a kilowatt-hora hay que considerar las tarifas eléctricas, la ubicación del sistema y la irradiación solar, por lo tanto el costo del kilowatt-hora varía dependiendo de la zona.

En general se consideran 5.5 horas para lugares de alta irradiación y 2.5 horas para lugares con irradiación baja. El costo en dólares para un sistema residencial de 2kWh conectado a la red con baterías de respaldo es de⁶⁸:

- Alta irradiación: 37.01 centavos por kilowatt-hora (2 a 5 veces más que las tarifas residenciales)
- Baja irradiación: 81.42 centavos por kilowatt-hora

Se está buscando reducir el costo de los módulos solares entre 1.5 y 2 USD por watt-pico para la próxima década, así como lograr un mayor número de sistemas conectados a la red y que los subsidios no sean necesarios.

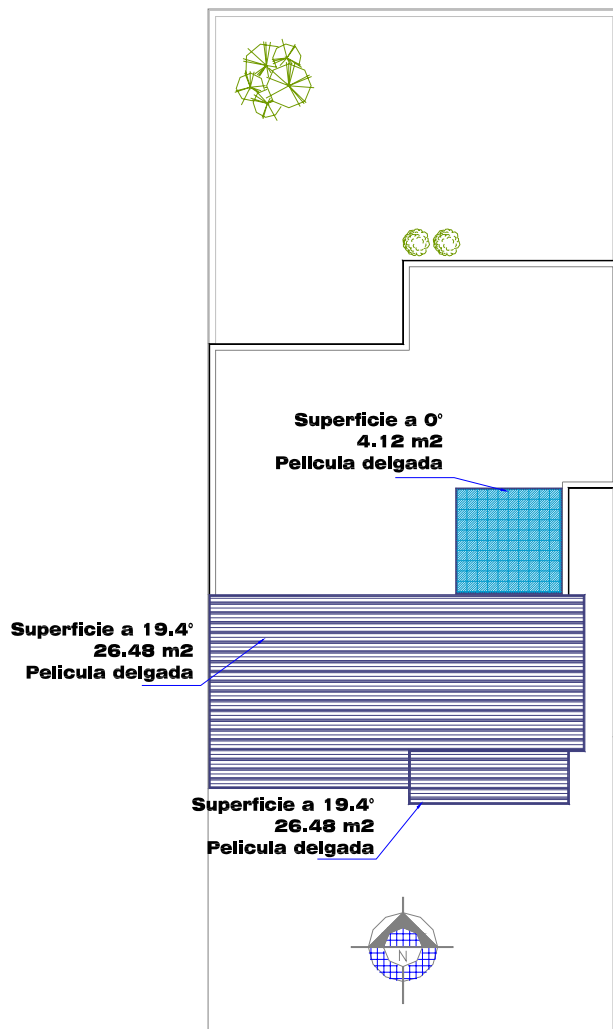
⁶⁸ Solarbuzz, Portal to the World of Solar Energy. Disponible en <http://www.solarbuzz.com>

En México no se ha impulsado el uso de la energía solar fotovoltaica, como en otros países, en donde se dan subsidios para su colocación y en donde la ley exige su instalación, como en España. De acuerdo al portal de Solarbuzz, alrededor del 59% de los sistemas instalados en el mundo, durante los últimos 5 años, son conectados a la red y las instalaciones siguen creciendo.

Como puede verse en el estudio la opción más económica es la que esta conectada a la red además de que tiene mayor eficiencia, ya que al no tener baterías hay menos pérdidas. La tendencia muestra que los precios sigan bajando y a largo plazo será posible que se utilicen sistemas fotovoltaicos con mayor frecuencia y que sean competitivos.

5.5 DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO ARQUITECTÓNICAMENTE

Figura 5.2 Planta y áreas de captación



PLANTA DE AZOTEA

Fuente: elaboración propia

En base al modelo de vivienda utilizado anteriormente se presenta un caso hipotético, sin considerar el costo, conectado a la red y con la posibilidad de entregar sus excedentes a la misma. Se utilizan todas las superficies útiles para obtener mayor generación de electricidad.

Se supone que la vivienda se ubica en una privada con viviendas de la misma altura para evitar sombras, con colindancia al oeste, en un lote en esquina con la fachada principal orientada al sur (figura 5.2). Por lo tanto se puede aprovechar para la captación de energía la cubierta y las fachadas sur y este por medio de ventanas con cristales fotovoltaicos (figura 5.3).

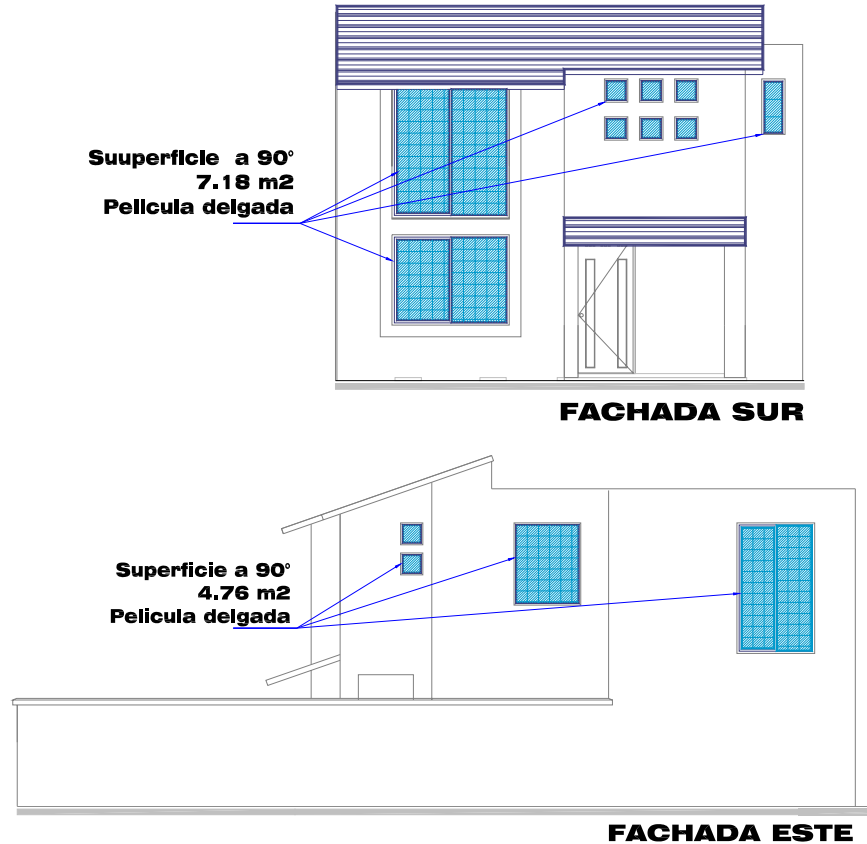
La cantidad de energía eléctrica que puede obtenerse se calcula con la siguiente expresión:

Energía producida = Área de captación x Eficiencia de la celda x Eficiencia del sistema x Irradiación sobre la superficie

Las áreas útiles de la envolvente de la vivienda son:

Área fachada sur. Superficie 90°, ventanas con silicio amorfo	7.18 m ²
Área azotea. Superficie con inclinación de 19.4°, con silicio monocristalino	30.81 m ²
Área fachada este. Superficie 90° ventana con silicio amorfo	4.76 m ²
Área azotea. Superficie 0° domo con silicio amorfo	4.12 m ²

Figura 5.3, Fachadas y áreas de captación



Fuente: Elaboración propia

Se proponen celdas de silicio monocristalino con una eficiencia del 12% para los elementos de cubierta y para las ventanas, silicio amorfo, con una eficiencia del 8%, colocado en el 50% de la superficie para que permitan el paso de la luz.

La eficiencia del sistema se determina con la eficiencia del inversor, las pérdidas en el cableado y la eficiencia de trabajo de las celdas, que considera pérdidas por temperatura y funcionamiento. Dichas eficiencias se utilizaron para el cálculo anterior, por lo tanto:

- Eficiencia del inversor 95%
- Eficiencia del cableado 90%
- Eficiencia de trabajo de las celdas 90%
- Eficiencia del sistema $= 0.95 \times 0.90 \times 0.90 = 0.77 = 77\%$

La irradiación sobre la superficie puede ser obtenida de los datos meteorológicos y de energía solar de la NASA, para superficies con diferente inclinación, horizontal (0°), vertical (90°) y 19°, que corresponde a la latitud del lugar (tabla 5.13).

Tabla 5.13 Promedio mensual de irradiación incidente en superficies inclinadas (kWh/m²/día)

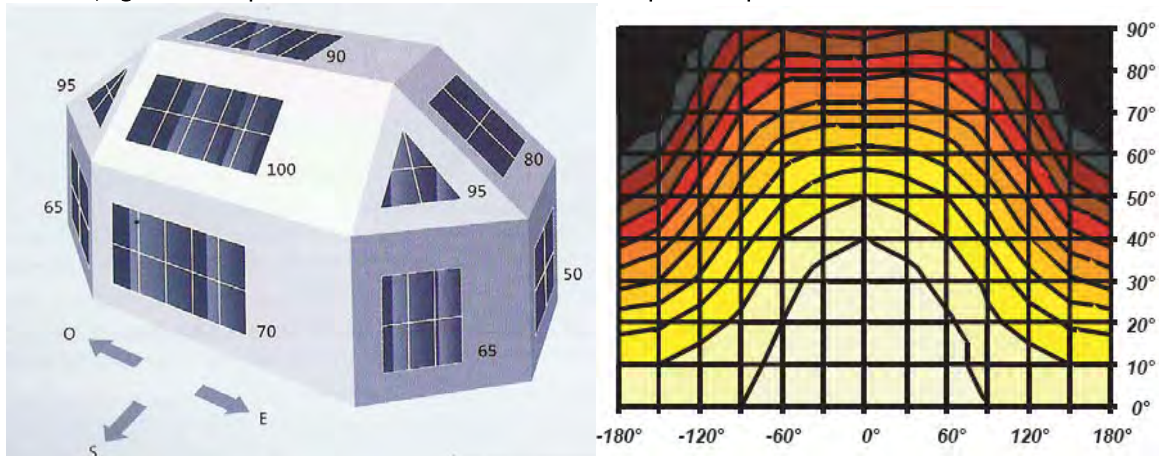
Lat. 19.4° Long. -99.2°	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Ángulo 0°	4.74	5.68	6.47	6.38	6.21	5.57	5.48	5.31	4.88	4.87	4.77	4.34
Ángulo 19°	5.78	6.51	6.88	6.29	5.79	5.59	5.46	5.14	4.97	5.33	5.68	5.29
Ángulo 90°	4.85	4.50	3.47	2.18	1.75	2.43	2.29	1.83	2.35	3.34	4.52	4.47

Fuente: "Surface meteorology and Solar Energy". Disponible en <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>

Los datos de irradiación son para superficies orientadas al sur, para obtener la irradiación de superficies con diferente orientación existen tablas y programas que calculan un porcentaje con respecto a la orientación sur, o bien puede hacerse el cálculo para un día determinado con la ecuación de irradiancia para superficies inclinadas utilizada en el capítulo 2. En este caso se utilizan los datos mostrados en las figuras 5.4 y 5.5

Izquierda, figura 5.4, Porcentaje de aprovechamiento para diferentes superficies

Derecha, figura 5.5 Captación solar anual. Irradiación en superficies para la ciudad de México



Fuente: Figura 5.2 ANTHONY, Falk "Fotovoltaica para profesionales. Diseño instalación y comercialización de plantas solares fotovoltaicas" Progensa, Sevilla, España. 2006

Figura 5.3 MULGRAVE, Victoria, Designing with solar power: a source book for building integrated photovoltaics (BIPV). London Earthscan, 2005

La figura 5.3 indica el porcentaje de irradiación para diferentes superficies, los números verticales se refieren a la inclinación de la superficie, los números de la parte inferior indican el azimut: 0° para la orientación sur, 180° para la orientación norte, valores positivos para el oeste y negativos para el este. El color amarillo claro es para una captación mayor del 90%, el amarillo oscuro de 80% a 90%, naranja de 70% a 80% y rojo 60% a 70%. Para una superficie inclinada 90° y con un azimut de -90°, equivalente a la orientación este, el porcentaje de captación es menor de 60%, por lo que se considera un valor de 50%, semejante al mostrado en la figura 5.2.

Con los datos anteriores es posible calcular la energía producida por la vivienda durante cada mes y finalmente la energía de todo el año (tablas 5.14 y 5.15)

Tabla 5.14, generación de energía promedio por día. kWh

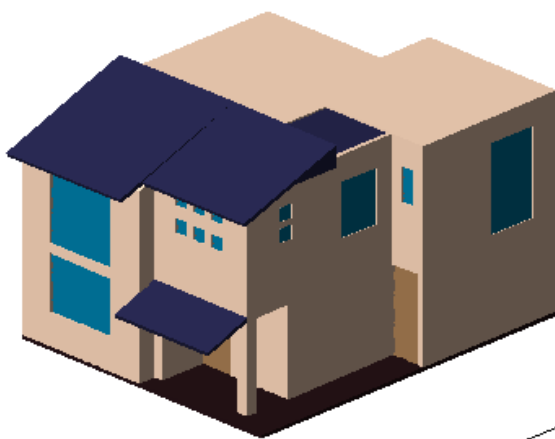
AREA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
Fachada sur	1.07	0.99	0.77	0.48	0.39	0.54
Cubierta azotea	16.44	18.52	19.57	17.9	16.47	15.90
Fachada este	0.42	0.48	0.50	0.46	0.42	0.41
Domo	0.60	0.72	0.82	0.81	0.79	0.71
TOTAL	18.54	20.71	21.66	19.65	18.07	17.56
AREA	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Fachada sur	0.51	0.40	0.52	0.74	1.00	0.99
Cubierta azotea	15.53	14.62	14.14	15.16	16.16	15.05
Fachada este	0.40	0.38	0.36	0.39	0.42	0.39
Domo	0.69	0.67	0.62	0.62	0.60	0.55
TOTAL	17.13	16.08	15.64	16.91	18.18	16.98

Tabla 5.15, generación de energía promedio por mes. kWh

AREA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	
Fachada sur	33.23	27.85	23.77	14.45	11.99	16.11	
Cubierta azotea	509.77	518.59	606.78	536.85	510.65	477.11	
Fachada este	13.13	13.35	15.62	13.82	13.15	12.29	
Domo	18.63	20.17	25.44	24.27	24.41	21.19	
TOTAL	574.75	579.95	671.61	589.40	560.20	526.69	
AREA	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	TOTAL
Fachada sur	15.69	12.54	15.58	22.88	29.97	30.62	254.68
Cubierta azotea	481.54	453.32	424.19	470.08	484.79	466.55	5940.21
Fachada este	12.40	11.67	10.92	12.10	12.48	12.01	152.96
Domo	21.54	20.87	18.57	19.15	18.15	17.06	249.45
TOTAL	531.18	498.41	469.26	524.21	545.38	526.25	6597.29

Fuente: Elaboración propia

Figura 5.6 Vivienda con un sistema fotovoltaico integrado



El modelo de vivienda puede generar con un área aproximada de 47m², en un día de diciembre 16.91kWh como mínimo, que es un valor mayor al consumo estimado de 11.80kWh y en un año genera 6597kWh, lo que significa que podría ser autosuficiente y proporcionar energía a la red eléctrica, si la tecnología fotovoltaica fuera más económica, además de estar integrada en ventanas y cubiertas como se ve en la figura 5.6.

Fuente: Elaboración propia

5.6 PROSPECTIVA SOBRE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

Uno de los objetivos de esta investigación es la elaboración de un estudio prospectivo sobre la evolución de los sistemas fotovoltaicos y su uso en viviendas en zonas urbanas. La prospectiva permite plantear diferentes escenarios para una situación determinada.

5.6.1 METODO DE ESCENARIOS

Construcción de la base analítica e histórica

Los sistemas fotovoltaicos utilizan celdas solares para generar energía eléctrica utilizando la radiación proveniente del sol. En 1958 se utilizaron las primeras celdas solares para generar energía eléctrica en un satélite, el Vanguard I, los primeros avances que se lograron estaban relacionados a la investigación espacial y la fabricación de celdas era muy costosa⁶⁹. Debido a la crisis energética de 1973 la investigación de celdas solares para aplicaciones terrestres aumentó, generándose un mayor interés por las energías alternas.

La tecnología fotovoltaica ha evolucionado durante los últimos cincuenta años, en un principio se obtenían eficiencias del 3%, ahora se logran rendimientos hasta del 20% con menos material, los costos también se han reducido, en los años cincuentas el watt instalado costaba 1,000 dólares, actualmente está entre 4 y 5 dólares por watt-pico, gracias a que en países como Alemania, Japón y Estados Unidos se ha promovido y desarrollado la tecnología y los gobiernos otorgan subsidios para hacerla más accesible⁷⁰.

Aún así los costos son elevados, debido a que el silicio, que es la materia prima principal para la fabricación de celdas fotovoltaicas, es difícil de obtener y procesar. Es por ello que los sistemas fotovoltaicos se encuentran en proceso de investigación, se estudian nuevos materiales y se pretende mejorar la eficiencia del silicio utilizado comercialmente, que puede tener un rendimiento hasta del 20% y hasta un 30% en laboratorio. De este modo podrán reducirse los costos, que son muy elevados y poco competitivos con las formas convencionales de generación de energía.

Delimitación del sistema.

Delimitar el sistema consiste en elaborar una lista lo más completa posible de las variables que lo caracterizan, para tener una definición del mismo, analizando como está formado y como se relacionan todos los elementos que lo integran.

El sistema fotovoltaico puede dividirse en cinco subsistemas básicos, en cada uno de ellos influyen diversas variables, internas y externas (tabla 5.16).

Las variables internas del sistema son:

1. Eficiencia
2. Materiales
3. Desarrollo tecnológico
4. Diseño

⁶⁹ SÁNCHEZ JUÁREZ, Aarón. Tecnologías Fotovoltaicas. Estado Actual y Futuro Solar. Departamento de Materiales Solares. CIE UNAM, Edición 2007

⁷⁰ AGREDANO DÍAZ, Jaime. Prospectiva de la Tecnología Solar Fotovoltaica para la Generación de Electricidad. Instituto de Investigaciones Eléctricas. División de Energías Alternas, gerencia de energías no convencionales.

5. Instalación

Las variables externas son:

1. Irradiación
2. Orientación
3. Temperatura
4. Coordenadas geográficas
5. Estación del año
6. Consumo eléctrico
7. Costos
8. Normatividad
9. Área disponible
10. Integración Arquitectónica

Tabla 5.16 Delimitación del sistema fotovoltaico

SISTEMA FOTOVOLTAICO			
SUBSISTEMA	CARACTERÍSTICAS	VARIABLES INTERNAS	VARIABLES EXTERNAS
Subsistema de captación de energía	Arreglo fotovoltaico formado por módulos interconectados	Eficiencia Materiales Desarrollo tecnológico Diseño Instalación	Irradiación Orientación Temperatura Coordenadas geográficas Estación del año Consumo eléctrico Costos Normatividad Área disponible Integración Arquitectónica
Subsistema de regulación y adaptación del suministro eléctrico	Regulador de carga Inversor de corriente para transformar la energía generada en corriente continua a corriente alterna	Eficiencia Diseño Instalación	Consumo eléctrico Costos Normatividad
Subsistema de acumulación	Baterías	Eficiencia Materiales Diseño Instalación	Consumo eléctrico Costos
Subsistema de transporte de energía eléctrica	Cableado para la conducción de la electricidad	Diseño Instalación	Consumo eléctrico Costos
Subsistema de control, medida y protección	Interruptores y fusibles. Supervisión de la carga, registro de producción, protección de sobrecargas, corto circuito.	Diseño Instalación	Consumo eléctrico Costos

Fuente: Elaboración propia

Una vez definidas las variables hay que determinar las interrelaciones que existen entre ellas por medio de una matriz de análisis estructural.

5.6.1.1. MATRIZ DE ANALISIS ESTRUCTURAL

El primer paso consiste en realizar una matriz de interrelación entre las variables que caracterizan el sistema fotovoltaico. El tipo de relación puede ser:

Nula	N
Débil	D
Media	M
Fuerte	F
Potencial	P

Asignándole un número a cada una de las variables se obtiene la siguiente matriz:

MATRIZ DE INTERRELACIÓN																	
		VARIABLES INTERNAS					VARIABLES EXTERNAS										
No		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	VARIABLES INTERNAS	Eficiencia		P	P	F	D	N	N	N	N	N	N	F	N	F	M
2		Materiales	P		P	N	N	N	N	N	N	N	N	F	N	P	F
3		Desarrollo tecnológico	P	F		F	D	N	M	N	N	N	N	F	M	F	F
4		Diseño	N	N	N		P	N	N	N	N	N	N	F	D	F	M
5		Instalación	N	N	N	M		N	N	N	N	N	N	F	F	P	P
6	VARIABLES EXTERNAS	Irradiación	N	M	N	F	F		P	F	N	N	N	N	N	N	N
7		Orientación	F	N	N	F	F	D		N	N	N	N	N	N	N	M
8		Temperatura	F	M	N	F	N	N	N		N	N	M	N	N	N	N
9		Coordenadas geográficas	N	N	N	F	F	P	M	M		F	M	D	N	N	N
10		Estación del año	M	N	N	F	N	P	M	P	N		F	N	N	N	N
11		Consumo eléctrico	D	N	N	P	P	N	N	N	N	N		P	N	P	F
12		Costos	N	N	N	N	F	N	N	N	N	N	N		N	N	M
13		Normatividad	N	N	N	F	F	N	N	N	N	N	D	D		N	M
14		Área disponible	N	D	N	N	M	N	N	N	N	N	N	P	N		P
15		Integración Arquitectónica	M	D	D	M	F	N	N	N	N	N	N	P	N	F	

Fuente: Elaboración propia

Con el análisis de relación entre las variables se procede a asignarles un valor numérico para poder realizar la matriz de análisis estructural que proporciona valores de motricidad y dependencia para cada una de las variables analizadas.

Valores de acuerdo al tipo de relación:

Media, nula o débil	0
Fuerte o potencial	1

Sustituyendo el tipo de relación por su valor numérico se obtiene la matriz de análisis estructural:

MATRIZ DE ANALISIS ESTRUCTURAL																			
No.			VARIABLES INTERNAS					VARIABLES EXTERNAS										MOTRICIDAD	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
1	VARIABLES INTERNAS	Eficiencia		1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	5
2		Materiales	1		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	5
3		Desarrollo tecnológico	1	1		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	6
4		Diseño	0	0	0		1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	3
5		Instalación	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	4
6	VARIABLES EXTERNAS	Irradiación	0	0	0	1	1		1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4
7		Orientación	1	0	0	1	1	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
8		Temperatura	1	0	0	1	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	2
9		Coordenadas geográficas	0	0	0	1	1	1	0	0		1	0	0	0	0	0	0	4
10		Estación del año	0	0	0	1	0	1	0	1	0		1	0	0	0	0	0	4
11		Consumo eléctrico	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0		1	0	1	1	1	5
12		Costos	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	1
13		Normatividad	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	2
14		Área disponible	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		1	1	2
15		Integración Arquitectónica	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1		1	3
DEPENDENCIA			4	2	2	9	8	2	1	2	0	1	1	8	1	7	5	53	

Fuente: Elaboración propia

La causalidad que una variable ejerce sobre las restantes se denomina motricidad y se obtiene sumando las filas. A su vez, el impacto que las diferentes variables ejercen sobre una en particular se denomina dependencia y se obtiene sumando las columnas. A cada variable se le asigna un porcentaje de motricidad y dependencia con respecto del total (tabla 5.17).

Tabla 5.17 Valores de Motricidad y Dependencia

CALCULO DE VALORES DE MOTRICIDAD Y DEPENDENCIA						
No	VARIABLES	CODIGO	VALORES DE MOTRICIDAD	%	VALORES DE DEPENDENCIA	%
VARIABLES INTERNAS						
1	Eficiencia	V1	5	9.4%	4	7.5%
2	Materiales	V2	5	9.4%	2	3.8%
3	Desarrollo tecnológico	V3	6	11.3%	2	3.8%
4	Diseño	V4	3	5.7%	9	1.7%
5	Instalación	V5	4	7.5%	8	1.5%
VARIABLES EXTERNAS						
6	Irradiación	V6	4	7.5%	2	3.8%
7	Orientación	V7	3	5.7%	1	1.9%
8	Temperatura	V8	2	3.8%	2	3.8%
9	Coordenadas geográficas	V9	4	7.5%	0	0.0%
10	Estación del año	V10	4	7.5%	1	1.9%
11	Consumo eléctrico	V11	5	9.4%	1	1.9%
12	Costos	V12	1	1.9%	8	1.5%
13	Normatividad	V13	2	3.8%	1	1.9%
14	Área disponible	V14	2	3.8%	7	1.3%
15	Integración Arquitectónica	V15	3	5.7%	5	9.4%

Fuente: Elaboración propia

5.6.1.2 PLANO DE MOTRICIDAD-DEPENDENCIA

Los datos obtenidos de los valores de motricidad y dependencia se utilizan para elaborar un plano cartesiano denominado plano de motricidad-dependencia.

Para obtener el eje que divide al plano en cuatro cuadrantes se obtiene el promedio con la siguiente expresión: $m = 100 / n$

Donde:

m = promedio; n = número de variables

De esta forma se pueden graficar los porcentajes obtenidos. En el plano cartesiano se pueden identificar cuatro zonas:

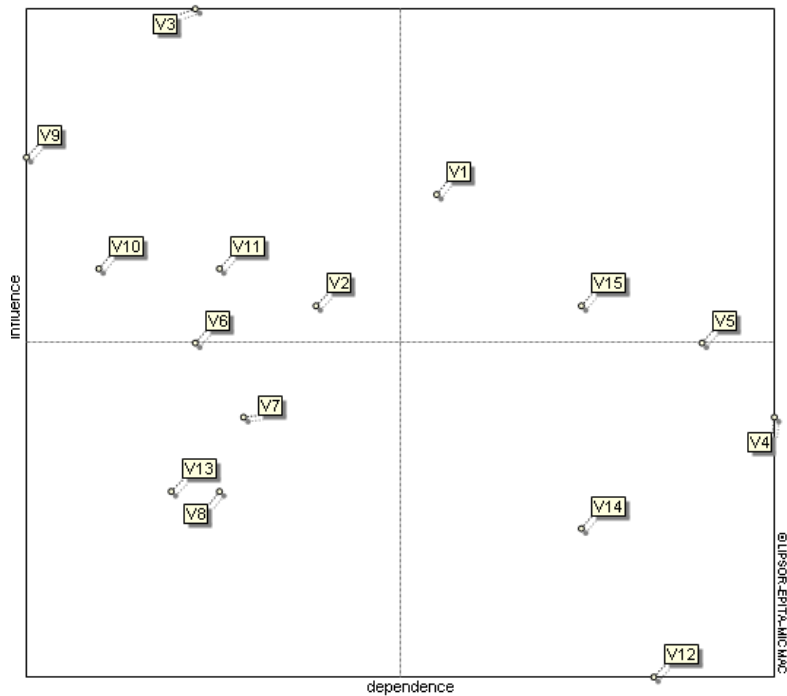
- En la zona 1 (cuadrante superior izquierdo) se encuentran las variables muy motrices y poco dependientes. Son las variables explicativas (zona de poder).
- En la zona 2 (cuadrante superior derecho) se encuentran las variables muy motrices y muy dependientes. Son las variables de enlace y son inestables (zona de conflicto).
- En la zona 3 (cuadrante inferior derecho) se encuentran las variables poco motrices y muy dependientes. Son las variables resultantes su evolución se explica por las variables de los sectores 1 y 2 (zona de salida).
- En la zona 4 (cuadrante inferior izquierdo) se encuentran las variables poco motrices y poco dependientes. Estas variables constituyen tendencias fuertes o factores relativamente autónomos (zona de dependencia).

Para obtener un resultado más confiable se utilizó el software prospectivo MICMAC ©, en el que el sistema llega a un estado estable a través de la multiplicación matricial, el programa muestra los siguientes resultados:

- influencia directa potencial entre las variables
- influencia indirecta potencial entre las variables

En cada uno de los casos el programa da como resultado el plano de motricidad-dependencia (figura 5.7) y un diagrama de las relaciones de dependencia entre las variables:

Figura 5.7 Influencia directa potencial entre las variables



Fuente: Elaboración propia, a partir de los datos obtenidos en el programa MICMAC ©

La tabla 5.18 muestra como quedan clasificadas las variables en las diferentes zonas después de haber realizado el plano de motricidad-dependencia:

Tabla 5.18 Resultados de la influencia directa potencial de las variables

VARIABLES MOTRICES	VARIABLES DE ENLACE
(V2) Materiales (V3) Desarrollo tecnológico (V6) Irradiación (V9) Coordenadas geográficas (V10) Estación del año (V11) Consumo eléctrico	(V1) Eficiencia (V5) Instalación (V15) Integración Arquitectónica
VARIABLES AUTONOMAS	VARIABLES RESULTANTES
(V7) Orientación (V8) Temperatura (V13) Normatividad	(V4) Diseño (V12) Costos (V14) Área disponible

Fuente: Elaboración propia, a partir de los datos obtenidos en el programa MICMAC ©

Para el caso de la influencia directa, las variables más importantes son los materiales, el desarrollo tecnológico, la irradiación, las coordenadas, la estación del año y el consumo eléctrico, son explicativas y las más motrices, los cambios que se generen en ellas producen a su vez cambios en otras variables.

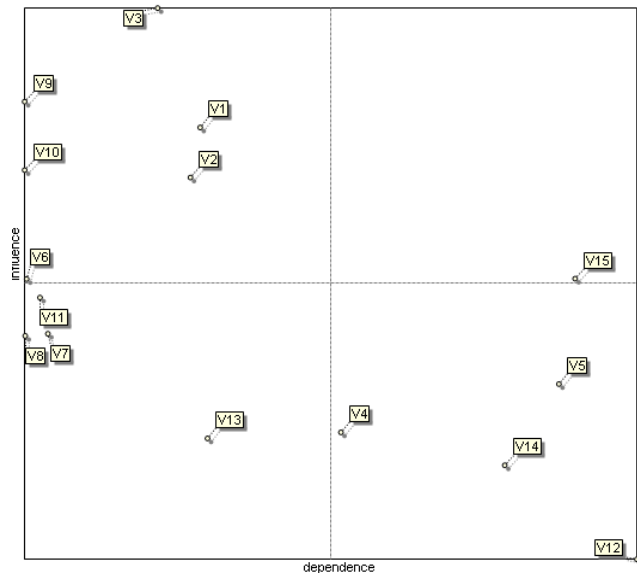
Las variables de enlace son la eficiencia, la instalación y la integración arquitectónica son variables que deben ser estudiadas para lograr mejoras por que pueden significar un cuello de botella en el desarrollo del sistema.

Influencia indirecta potencial entre las variables

La matriz de influencias indirectas, corresponde al resultado de la multiplicación de la matriz de influencias directas. A partir de esta matriz se da una nueva clasificación de las variables enfatizando las más importantes del sistema, sirve para detectar las variables ocultas gracias a la multiplicación matricial.

El programa permite estudiar los impactos y retroalimentaciones entre las variables y las ordena por el grado de influencia, así podemos conocer cuales son las variables más importantes. En la figura 5.9 se muestra el plano de motricidad-dependencia para las influencias indirectas potenciales y en la figura 5.10 el diagrama de las influencias indirectas.

Figura 5.9 Influencia indirecta potencial entre las variables



Fuente: Elaboración propia, a partir de los datos obtenidos en el programa MICMAC ©

Después de la multiplicación matricial para el caso de las influencias indirectas algunas variables cambiaron de cuadrante: la Eficiencia (V1), cambio del cuadrante de enlace al cuadrante de motricidad, la Instalación (V5), ya no es una variable de enlace si no resultante y el Consumo eléctrico (V11), se mueve del cuadrante de motricidad al cuadrante de autonomía (Tabla 5.19).

Tabla 5.19 Resultados de la influencia indirecta potencial de las variables

VARIABLES MOTRICES	VARIABLES DE ENLACE
(V1) Eficiencia (V2) Materiales (V3) Desarrollo tecnológico (V6) Irradiación (V9) Coordenadas geográficas (V10) Estación del año	(V15) Integración Arquitectónica
VARIABLES AUTONOMAS	VARIABLES RESULTANTES
(V7) Orientación (V8) Temperatura (V11) Consumo eléctrico (V13) Normatividad	(V4) Diseño (V5) Instalación (V12) Costos (V14) Área disponible

Fuente: Elaboración propia, a partir de los datos obtenidos en el programa MICMAC ©

- V10 Estación del año
- V11 Consumo eléctrico
- V12 Costos
- V14 Área disponible
- V15 Integración Arquitectónica

5.6.1.3 JUEGO DE ACTORES

Después de realizar el análisis estructural para conocer las variables claves que condicionan el futuro del sistema fotovoltaico, se deben de identificar a los actores que ejercen una influencia y controlan de una u otra manera dichas variables.

El análisis del juego de actores confronta sus proyectos y analiza sus fuerzas, ayuda a evaluar los retos estratégicos y las cuestiones clave para el futuro. Este análisis permite construir la base para la elaboración de escenarios.

En base a la consulta de expertos y a la información obtenida en la investigación, los principales actores y las variables sobre las que influyen se muestran en las tablas 5.20 y 5.21 respectivamente.

Tabla 5.20 Actores que influyen en el sistema fotovoltaico

ACTORES	OBJETIVOS	PROBLEMAS	MEDIOS
(A1) Investigador	Mejorar la eficiencia de los materiales. Difundir los resultados obtenidos. Dar seguimiento al uso de la tecnología. Solicitar apoyos para la investigación	Falta de recursos y de apoyo para la investigación. Poca difusión de resultados	Apoyo de instituciones privadas, educativas y gubernamentales
(A2) Productor	Producir celdas fotovoltaicas más eficientes. Mejorar la calidad y reducir costos	Elevado costo de materiales de fabricación de los elementos del sistema	Crear plantas productoras de sistemas fotovoltaicos
(A3) Proveedor	Distribuir la tecnología fotovoltaica y difundir su uso. Colaboración con los productores para reducir costos.	Alto costo de importación, por lo tanto dificultad para distribuir el sistema	Difusión por medio de publicidad y apoyo de diversas instituciones y de arquitectos
(A4) Arquitecto	Utilizar sistemas fotovoltaicos en proyectos arquitectónicos. Lograr un diseño óptimo. Difundir el uso de la tecnología fotovoltaica	Renuencia de los usuarios a aceptar la tecnología y a tener una cultura de ahorro energético. Costos muy elevados.	Aplicación de la tecnología en nuevos proyectos y proyectos existentes
(A5) Usuario	Ahorrar energía y obtener beneficios económicos	No poder comprar la tecnología debido al costo	Obtener información por medio de arquitectos y proveedores
(A6) Instituciones Gubernamentales	Obtener beneficios para la población y para el país. Reglamentar el uso de sistemas fotovoltaicos	Falta de información. Papeleo, prohibición.	Elaboración de normas, leyes y reglamentos

Fuente: elaboración propia

Tabla 5.21 Relación variables-actores

VARIABLES	ACTORES	VARIABLES	ACTORES
(V1) Eficiencia	Investigador, productor	(V9) Coordenadas geográficas	Usuario
(V2) Materiales	Investigador, productor	(V10) Estación del año	Usuario
(V3) Desarrollo Tecnológico	Investigador, productor	(V11) Consumo eléctrico	Usuario
(V4) Diseño	Arquitecto, proveedor	(V12) Costos	Productor, proveedor
(V5) Instalación	Arquitecto, proveedor	(V13) Normatividad	Instituciones gubernamentales
(V6) Irradiación	Usuario	(V14) Área disponible	Usuario, arquitecto
(V7) Orientación	Usuario	(V15) Integración Arquitectónica	Arquitecto, proveedor
(V8) Temperatura	Usuario		

Fuente: Elaboración propia

El siguiente paso consiste en elaborar el cuadro de estrategia de actores estudiando su interrelación para identificar los retos y objetivos asociados a cada uno de ellos (Tabla 5.22).

Tabla 5.22 Cuadro de estrategia de los actores del sistema fotovoltaico.

	INVESTIGADOR	PRODUCTOR	PROVEEDOR	ARQUITECTO	USUARIO	INST. GUBERNAMENTALES
INVESTIGADOR	Intercambio de información y retroalimentación para lograr mayores avances tecnológicos	Proporcionan información que permite desarrollar nuevos materiales para ser comercializados	Proporcionan información sobre nuevas tecnologías	Fuente de información de avances tecnológicos	Nula	Difundir el conocimiento para la aplicación de nuevos materiales y tecnologías
PRODUCTOR	Impulso a investigadores para lograr mayores avances en el proceso de investigación	Se fomenta la competencia y así se logra reducir costos y mejorar la calidad	Distribución de los sistemas y tecnologías para obtener mayor difusión	Difusión de la tecnología y propuestas para su uso	Distribución de la tecnología	Información de las tecnologías para proponer subsidios y así acceder a una mayor parte de la población
PROVEEDOR	Nula	Importación de la tecnología	Se fomenta la competencia y así se logra reducir costos y mejorar la calidad	Recomendaciones de diseño e instalación	Recomendaciones de instalación y uso	Negociación para distribuir la tecnología fotovoltaica.
ARQUITECTO INGENIERO	Uso de la tecnología fomentando el avance de las investigaciones	Consumo de los diferentes productos	Asesoría técnica	Comparten información y la introducen dentro de su campo de trabajo	Difusión de la tecnología y aplicación en diferentes proyectos	Trabajo coordinado para introducir nuevas tecnologías

	INVESTIGADOR	PRODUCTOR	PROVEEDOR	ARQUITECTO	USUARIO	INST. GUBERNAMENTALES
USUARIO	Informa sobre resultados del uso del sistema	Proponen mejoras y manifiestan sus necesidades	Nula	Proporcionan la información necesaria para el diseño del sistema	Difunden el uso de la tecnología fotovoltaica	Informan sobre los resultados del uso del sistema
INST. GUBERNAMENTALES	Ofrecen apoyo a la investigación	Negocian para hacer la tecnología más accesible	Establecen lineamientos para el uso, distribución y colocación	Establecen lineamientos para la colocación	Proporciona subsidios	Analizan el uso de los sistemas fotovoltaicos y los beneficios para la sociedad y el país

Fuente: Elaboración propia

Con la información anterior es posible identificar los objetivos que son perseguidos por los actores y que están ligados a las variables clave. En el caso de los sistemas fotovoltaicos los principales objetivos son:

- | | | | |
|----|--|-----|--|
| O1 | Mejorar la eficiencia de los materiales utilizados comercialmente. | O6 | Distribución y fabricación de sistemas fotovoltaicos a nivel local. |
| O2 | Difusión, promoción y monitoreo de la tecnología fotovoltaica por parte de instituciones educativas, gubernamentales y privadas. | O7 | Reducción de consumos de energía y beneficios económicos y ambientales |
| O3 | Investigación y desarrollos de nuevos materiales. | O8 | Reglamentación del uso de sistemas fotovoltaicos. |
| O4 | Obtener apoyos para la investigación. | O9 | Integración arquitectónica en viviendas |
| O5 | Reducir costos de producción. | O10 | Uso de sistemas fotovoltaicos conectados a la red en zonas urbanas |

Una vez definidos los objetivos y estrategias de los actores se elabora la matriz de actores x actores, que permite localizar los proyectos y motivaciones de cada actor y sus medios de acción. Consiste en asignar valores a las influencias entre ellos, con el siguiente criterio:

0. No tiene ninguna influencia
1. Influye sobre la operatividad del otro actor
2. Influye sobre algunos objetivos estratégicos del otro actor
3. Influye sobre la estrategia del otro actor
4. Influye incluso sobre la existencia del otro actor

Con estos valores se construye la matriz que posteriormente será utilizada en el programa MACTOR®:

MATRIZ ACTORES X ACTORES	(A1) INVESTIGADOR	(A2) PRODUCTOR	(A3) PROVEEDOR	(A4) ARQUITECTO	(A5) USUARIO	(A6) INST. GUBERNA- MENTALES
(A1) INVESTIGADOR		3	1	1	0	1
(A2) PRODUCTOR	2		4	2	0	1
(A3) PROVEEDOR	0	3		2	1	1
(A4) ARQUITECTO	0	1	2		2	1
(A5) USUARIO	0	0	2	2		1
(A6) INST. GUBERNAMENTALES	1	1	0	1	0	

Fuente: Elaboración propia

El siguiente paso consiste en elaborar la matriz de actores x objetivos para estudiar sus relaciones y así conocer los conflictos o las posibilidades de alianzas, los valores utilizados para obtener la matriz son los siguientes:

4. El objetivo contribuye y fortalece la existencia del actor
3. El objetivo ayuda a cumplir la misión del actor
2. El objetivo contribuye al éxito del proyecto para mejoramiento del actor
1. El objetivo contribuye a una buena gestión del actor
0. El objetivo es indiferente para ese actor
- 1. El objetivo impide una buena gestión del actor
- 2. El objetivo no permite la realización de proyectos de mejoramiento del actor
- 3. El objetivo dificulta la misión del actor
- 4. El objetivo pone en cuestión la existencia del actor

Por lo tanto la matriz queda de la siguiente forma:

MATRIZ ACTORES OBJETIVOS										
	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10
A1	4	3	4	2	1	0	0	0	0	0
A2	3	3	2	0	4	-1	1	0	1	2
A3	3	2	2	0	4	4	1	1	2	3
A4	2	1	2	0	2	2	3	1	4	4
A5	1	0	1	0	2	2	3	0	1	3
A6	2	1	1	-1	2	2	2	3	2	1

Fuente: Elaboración propia

Por lo que puede verse, después del análisis hay muy pocos valores negativos, lo que muestra que en general no se presentan conflictos entre los actores y todos pueden apoyarse para obtener sus objetivos y que todos persiguen el fin de mejorar y apoyar la tecnología exceptuando las casillas donde el valor es de cero, lo que significa que la relación es nula, por ejemplo para los usuarios el principal objetivo es ahorrar energía, lo que se logrará cuando los otros actores cumplan con sus objetivos, principalmente en cuanto a la eficiencia y la reducción de costos.

El método MACTOR® (Matriz de Alianzas y Conflictos: Tácticas, Objetivos y Recomendaciones) propone un método de análisis del juego de los actores y algunas herramientas sencillas, facilitando al análisis de resultados.

Las matrices de actores x actores y actores x objetivos se introducen en el programa prospectivo MACTOR®, de este modo se obtienen las relaciones de influencia y dependencia, las divergencias y convergencias, que sirvan para evaluar las relaciones de los actores con respecto a los objetivos.

La figura 5.11 muestra una matriz de influencias directas e indirectas entre los actores. Los totales de las columnas muestran el grado de dependencia y la suma de los renglones el grado de influencia. El arquitecto (A4) y el proveedor (A3) son los actores más dependientes. Los que tiene mayor influencia son los productores (A2) y los investigadores (A1). El mayor valor de influencia es el que ejercen los productores sobre los proveedores.

Figura 5.11 (izquierda) Matriz de influencias directas e indirectas. Figura 5.12 (derecha) Escala de influencias

MD\A	A1	A2	A3	A4	A5	A6	=
A1	3	6	5	5	2	4	22
A2	3	7	7	6	3	4	23
A3	3	5	6	6	3	4	21
A4	2	4	5	6	3	4	18
A5	1	4	4	5	3	3	17
A6	2	3	3	3	1	3	12
D _i	11	22	24	25	12	19	113

© LIPSOR-EPITA-MACTOR

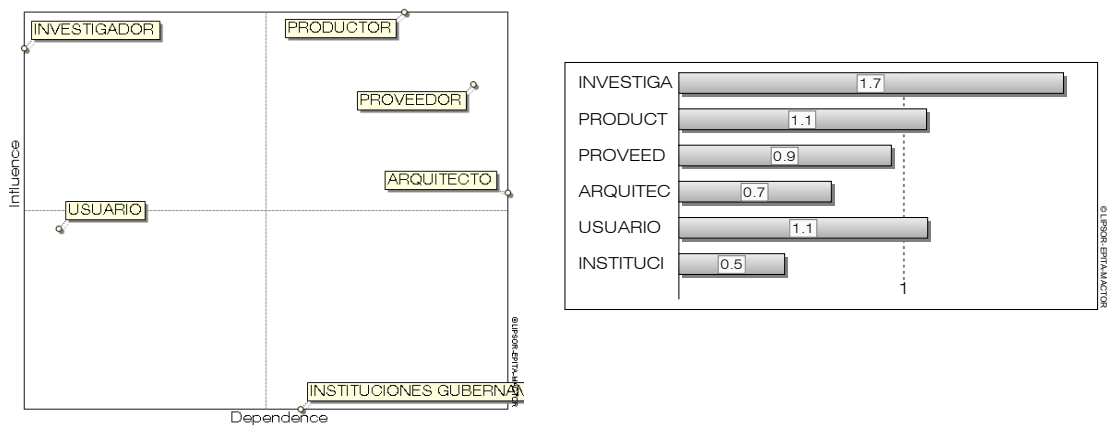
NS	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Sum
A1		3	2	3	1	2	11
A2	-3		2	2	-1	1	1
A3	-2	-2		1	-1	1	-3
A4	-3	-2	-1		-2	1	-7
A5	-1	1	1	2		2	5
A6	-2	-1	-1	-1	-2		-7

© LIPSOR-EPITA-MACTOR

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el programa MACTOR

La segunda matriz (figura 5.12) es la escala de influencias, en esta matriz los valores positivos son para los actores que ejercen más influencia de la que reciben, investigadores (A1) y usuarios (A5); los valores negativos son para los que reciben mayor influencia, arquitectos (A4) e instituciones gubernamentales (A6). La figura 5.13 indica la posición de los actores, con respecto a las influencias y dependencias entre ellos, las posiciones son calculadas por el programa MACTOR®.

Figura 5.13 (izquierda) Plano de influencia y dependencia entre actores. Figura 5.14 (derecha) Grado de influencia



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el programa MACTOR

El significado de la distribución en el plano es similar al del análisis estructural. El actor más dominante es el investigador (A1), los actores de enlace son el productor (A2), el proveedor (A3) y el arquitecto (A4), el usuario es un actor independiente y las instituciones gubernamentales son las más dependientes o dominadas. La figura 5.14 muestra la competitividad entre los actores, en base a las influencias y dependencias. Los que muestran mayor competitividad son: investigador (A1), productor (A2) y usuario (A5).

Relación entre actores y objetivos

La matriz de actores x objetivos da como resultado las matrices de la figura 5.15 y 5.16. En la primera matriz se puede ver qué objetivos puede cumplir cada actor (valores positivos), mejorar la eficiencia (O1), investigación y desarrollo de nuevos materiales (O3) y reducir costos de producción (O5) son los objetivos que tienen el mayor número de acuerdos. Por otra parte los valores negativos muestran en que objetivos hay desacuerdo, en este caso, es en la obtención de apoyos para la investigación (O4) y en la fabricación a nivel local (O6). El valor 0 indica una posición neutral ante los objetivos. La segunda matriz se complementa con la figura 5.17 y muestran el grado de movilización hacia los objetivos.

Figura 5.15. Matriz 1, actores por objetivos

1MAO	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10	Absolute sum
A1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	5
A2	1	1	1	0	1	-1	1	0	1	1	8
A3	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	9
A4	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	9
A5	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	7
A6	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	10
Number of agreements	6	5	6	1	6	4	5	3	5	5	
Number of disagreements	0	0	0	-1	0	-1	0	0	0	0	
Number of positions	6	5	6	2	6	5	5	3	5	5	

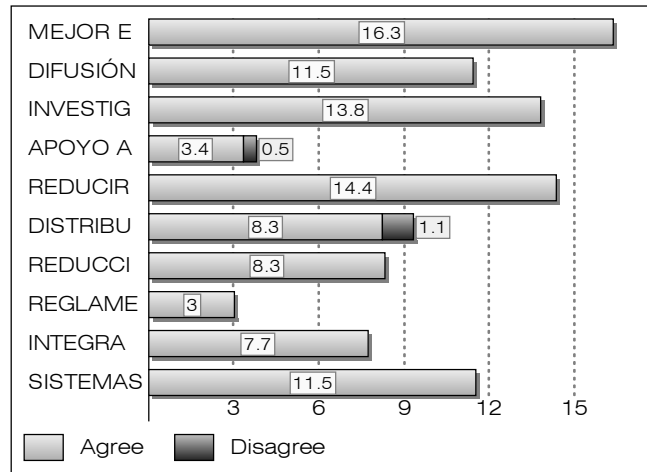
Figura 5.16. Matriz 2, actores por objetivos

3MAO	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10	Mobilisation
A1	6.8	5.1	6.8	3.4	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.9
A2	3.3	3.3	2.2	0.0	4.4	-1.1	1.1	0.0	1.1	2.2	18.7
A3	2.8	1.9	1.9	0.0	3.8	3.8	0.9	0.9	1.9	2.8	20.7
A4	1.4	0.7	1.4	0.0	1.4	1.4	2.0	0.7	2.7	2.7	14.2
A5	1.1	0.0	1.1	0.0	2.2	2.2	3.3	0.0	1.1	3.3	14.4
A6	0.9	0.5	0.5	-0.5	0.9	0.9	0.9	1.4	0.9	0.5	8.0
Number of agreements	16.3	11.5	13.8	3.4	14.4	8.3	8.3	3.0	7.7	11.5	
Number of disagreements	0.0	0.0	0.0	-0.5	0.0	-1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	
Degree of mobilisation	16.3	11.5	13.8	3.9	14.4	9.4	8.3	3.0	7.7	11.5	

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el programa MACTOR

En la segunda matriz los valores positivos significan la movilización hacia el objetivo y los negativos son el grado de oposición; el investigador (A1) y mejorar la eficiencia (O1), son el actor y el objetivo que tiene el mayor grado de movilización. En la figura 5.18 se aprecia que mejorar la eficiencia (O1) tiene un mayor grado de acuerdos, seguido de la reducción de costos (O5). Se presentan desacuerdos en el apoyo a la investigación (O4) y la distribución y fabricación a nivel local (O6).

Figura 5.18 Movilización de objetivos



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el programa MACTOR

Convergencias

La matriz de convergencias (figura 5.19) identifica el número de posiciones comunes respecto a los objetivos y las posibles alianzas, los valores más altos representan intereses comunes.

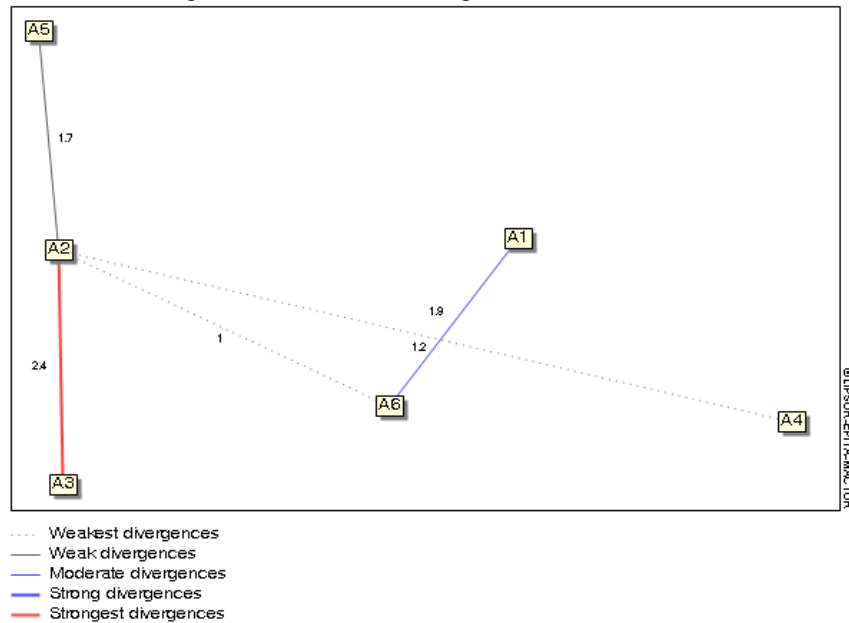
Figura 5.19 Matriz de convergencia

3CAA	A1	A2	A3	A4	A5	A6
A1	0.0	16.8	15.4	12.6	9.9	11.6
A2	16.8	0.0	16.8	14.9	13.2	11.4
A3	15.4	16.8	0.0	17.5	16.1	14.1
A4	12.6	14.9	17.5	0.0	13.6	10.9
A5	9.9	13.2	16.1	13.6	0.0	10.0
A6	11.6	11.4	14.1	10.9	10.0	0.0
Number of convergences	66.4	73.2	80.0	69.4	62.9	58.0
Degree of convergence (%)	0.0					

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el programa MACTOR

Los valores de convergencia representan las alianzas entre los actores. La convergencia más fuerte es “arquitecto(A4)-proveedor(A3)” ya que deben trabajar conjuntamente para lograr instalar sistemas fotovoltaicos; en un grado menor se encuentra la convergencia “proveedor(A3)-productor(A2)” estos actores deben llegar a acuerdos sobre la distribución y costos de los componentes del sistema; la convergencia “proveedor(A3)-instituciones gubernamentales(A6)” es todavía menor, lo que significa que es más difícil que lleguen a acuerdos, finalmente la convergencia más débil es “investigador(A1)-usuario(A5)” ya que el usuario depende de las actividades del investigador y es muy poco probable que realice alianzas con él (figura 5.20).

Figura 5.22 Grado de divergencia entre actores



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el programa MACTOR®

En resumen, las posiciones de cada uno de los actores son:

Investigador. Es el actor más dominante y competitivo, es el que ejerce mayor influencia sobre los demás. Los objetivos con los que tiene un mayor grado de acuerdo son: mejorar la eficiencia de los materiales, obtener apoyos para la investigación, principalmente de nuevos materiales, difusión, promoción y monitoreo de la tecnología y lograr la reducción de costos. Puede lograr estos objetivos mediante alianzas con el productor y el proveedor y encontrar problemas con instituciones gubernamentales para obtener apoyo para la investigación.

Productor. Es un actor de enlace, altamente competitivo y ambivalente ya que presenta puntos de acuerdo y desacuerdo con otros actores, ejerce mayor influencia sobre el proveedor con el que tiene el mayor desacuerdo debido a la fabricación a nivel local, sin embargo, esta de acuerdo en mejorar la eficiencia, la difusión, la investigación de nuevos materiales, la reducción de los consumos de energía, la integración arquitectónica y en el uso de sistemas conectados a la red. Puede realizar alianzas con el investigador de quien recibe influencia y con el proveedor si resuelven las diferencias. Presenta puntos de desacuerdos con el usuario y el arquitecto.

Proveedor. Es un actor de enlace con gran dependencia del productor. Es neutral respecto a los apoyos para la investigación, y esta de acuerdo con el resto de los objetivos, influye sobre el arquitecto con quien puede realizar alianzas al igual que las instituciones gubernamentales. Presenta divergencias con el productor con quien puede llegar a acuerdos para la distribución de los sistemas como se mencionó anteriormente y puede convertirse en productor si se da la fabricación a nivel local.

Arquitecto. Es un actor de enlace que depende del investigador, del productor y del usuario, esta de acuerdo con la mayoría de los objetivos, además de realizar alianzas con los proveedores así como con las instituciones gubernamentales para difundir y colocar sistemas

fotovoltaicos en las viviendas, en especial si se llegarán a realizar programas de apoyo o subsidios.

Usuario. Es un actor independiente, los objetivos con los que esta de acuerdo son: mejorar la eficiencia, investigación de nuevos materiales, reducción de costos, fabricación a nivel local, reducción en los consumos de energía y conexión a la red de sistemas fotovoltaicos.

Instituciones gubernamentales. Es el actor más dependiente o dominado, depende de investigadores y usuarios, para poder implementar programas de apoyo y es el que menos influye en los demás. Puede llegar a estar en desacuerdo con el apoyo a la investigación.

5.6.1.4 ANÁLISIS MORFOLÓGICO

El análisis morfológico explora los futuros posibles a partir del estudio de todas las combinaciones resultantes de la descomposición del sistema. La elección de los componentes del sistema se basa en el análisis estructural, de donde se obtuvieron las variables clave; de los objetivos y del juego de actores. En un principio el sistema fotovoltaico se dividió en cinco subsistemas, pero debido a las características del subsistema de acumulación y del subsistema de regulación-suministro eléctrico, para el análisis estructural pueden agruparse en un solo campo. Después del estudio de las variables clave y de los objetivos, las características de la instalación se agregan como un componente más del sistema. De este modo cada subsistema o componente del sistema fotovoltaico puede tener diferentes configuraciones, el conjunto de estas configuraciones es el espacio morfológico que permite identificar diferentes escenarios a partir de hipótesis sobre cada uno de los componentes (tabla 5.23).

Tabla 5.23. Análisis morfológico

COMPONENTE	HIPÓTESIS 1	HIPÓTESIS 2	HIPÓTESIS 3
1. Captación de energía	Se aumenta la eficiencia de los módulos de silicio y se importa la tecnología	Se mejora la eficiencia y se fabrican a nivel nacional	Se comercializan materiales nuevos más eficientes, económicos y de fabricación más sencilla
2. Acumulación, regulación y adaptación del suministro eléctrico	Mejora la eficiencia de productos importados	Mejora la eficiencia de productos nacionales	Se fabrican nuevas tecnologías de alta eficiencia
3. Instalación	Reducción en el consumo eléctrico, por el uso de aparatos eficientes permitiendo usar sistemas fotovoltaicos más pequeños	Aumenta el número de sistemas conectados a la red gracias a los subsidios y reglamentación. Mayor difusión	Instalaciones integradas a las construcciones gracias a nuevas tecnologías y dispositivos.

Fuente: Elaboración propia

La combinación de las hipótesis de cada uno de los componentes genera diversos escenarios futuros, en este caso se pueden tener 27 escenarios diferentes por lo que se deben de analizar y reducir de acuerdo a su probabilidad, en este caso las hipótesis 1 son las más probables, las hipótesis 2 son probables y las hipótesis 3 son las menos probables.

Para obtener un mejor análisis de los posible escenarios el cuadro de hipótesis del espacio morfológico se introduce en el programa prospectivo MORPHOL®. El análisis realizado por

dicho programa da como resultado las diferentes probabilidades de cada uno de los escenarios, en donde el escenario 1 1 1, corresponde a la hipótesis 1 ce cada uno de los componentes, el porcentaje de las probabilidades con respecto al espacio morfológico dadas por el programa, se muestra en la tabla 5.24.

Tabla 5.24 Probabilidad de escenarios

No.	ESCENARIO	PROBABILIDAD	No.	ESCENARIO	PROBABILIDAD
1	1 1 1	9.22	15	2 1 2	1.6
2	1 2 1	9.22	16	1 3 3	1.15
3	1 3 1	4.61	17	3 3 1	1.15
4	1 1 2	3.84	18	2 1 3	0.96
5	1 2 2	3.84	19	2 2 3	0.96
6	2 1 1	3.84	20	3 1 2	0.96
7	2 2 1	3.84	21	3 2 2	0.96
8	1 1 3	2.3	22	2 3 2	0.8
9	1 2 3	2.3	23	3 1 3	0.58
10	3 1 1	2.3	24	3 2 3	0.58
11	3 2 1	2.3	25	2 3 3	0.48
12	1 3 2	1.92	26	3 3 2	0.48
13	2 3 1	1.92	27	3 3 3	0.29
14	2 2 2	1.6			

Fuente: elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el programa MORPHOL

5.6.1.5 CONSTRUCCIÓN DE ESCENARIOS

Antes de proponer los diferentes escenarios, es importante recordar que, aunque están basados en el análisis detallado del sistema, solo representan una visión estudiada del futuro y no se puede afirmar que sucedan o que ocurran de la manera en que se plantean, sin embargo, se pueden elaborar estrategias para que las condiciones esperadas se den y evitar las circunstancias desfavorables. La tabla de probabilidad ayuda a plantear los posibles escenarios, los más importantes son los siguientes:

Existen dos escenarios con mayor probabilidad, uno de ellos (111) propone que la eficiencia de los módulos fotovoltaicos se mejorará, y los consumos de energía eléctrica también disminuirán, por lo tanto el área de la instalación se reducirá, aminorando también los costos, sin embargo la reducción de costos no es significativa debido a que se importa la tecnología en su totalidad y no se consideran programas de subsidios para promover su uso.

El segundo escenario (121) es similar al anterior, la única diferencia es que la parte de acumulación, regulación y adaptación no se importará, por lo que el costo es menor que en el escenario (111), haciendo que la tecnología sea más accesible. Una variación de este escenario, con el segundo lugar de probabilidad (131), se refiere a nuevas tecnologías de acumulación, regulación y adaptación, que dará como resultado mayor eficiencia y costos menores.

El tercer lugar de probabilidad presenta dos escenarios deseables, uno de ellos es similar al escenario (121) donde solo se importan los módulos, la diferencia se da en que considera sistemas conectados a la red y programas de subsidio (122). El otro escenario considera que toda la tecnología será nacional y que se reducirán los consumos de energía, por lo tanto el costo se reduce significativamente (221).

El cuarto lugar de probabilidad (123) se refiere a un escenario poco deseable, ya que aunque se mejora la tecnología se importa en su totalidad y no existen ahorros en el consumo ni programas de apoyo para su instalación.

Uno de los escenarios deseables es el que espera el uso de nuevos materiales que puedan ser fabricados localmente y con nuevas tecnologías de acumulación, regulación y adaptación que provoquen menos pérdidas y una instalación completamente integrada a la arquitectura, sin embargo es el que presenta la probabilidad más baja (333).

En conclusión, el método de escenarios es una herramienta que permite conocer las tendencias de la tecnología fotovoltaica. Los componentes se encuentran en un constante proceso de mejora lo que permitirá reducir las dimensiones de la instalación y por lo tanto los costos, sin embargo continúa siendo una tecnología importada y mientras no se desarrolle a nivel local no será de fácil acceso.

Una solución es la implementación de programas de apoyo, por parte de las instituciones gubernamentales, como los subsidios que se dan en países como España, Alemania y Japón. Gracias al uso de medidores bidireccionales los sistemas conectados a la red pueden desarrollarse cada vez más y promover la tecnología, que debe complementarse con una reglamentación adecuada.

Finalmente los avances de la nanotecnología y la investigación de nuevos materiales y dispositivos de almacenamiento tienden a fabricar sistemas más eficientes y celdas con menos material. Se espera obtener dentro de los próximos 10 años eficiencias mayores del 30%; también se busca utilizar materiales de fabricación más sencilla, lo que permitiría su elaboración en un mayor número de países. Dichos avances permitirán reducir los costos para que sea una tecnología que pueda competir con las formas convencionales de generación de energía y que sea accesible a un mayor número de personas.

CONCLUSIONES

La energía solar es una alternativa para generar electricidad y disminuir el consumo de combustibles fósiles. El consumo de energía eléctrica continuará creciendo debido a que habrá mayores necesidades de iluminación, acondicionamiento de aire y en general por los sistemas y dispositivos que están asociados a una mejor calidad de vida y las formas actuales de generación de energía no pueden seguir funcionando de la manera en que lo han hecho hasta ahora. Es importante mejorar la eficiencia de la generación eléctrica y reducir el consumo, ya que el petróleo es un recurso no renovable y en algún momento tendrá que agotarse.

La generación fotovoltaica integra nuevas tecnologías a la arquitectura y contribuye a reducir las emisiones de bióxido de carbono producidas por el consumo energético de las edificaciones durante su ciclo de vida.

La Ciudad de México es un lugar muy favorable para la instalación de un sistema fotovoltaico gracias a su ubicación, es una zona donde la radiación solar es alta y constante a lo largo del año, con un valor promedio de 5 kWh/m² al día, un valor mucho mayor que el de países como Alemania, Japón, España y Estados Unidos que son los que cuentan con el mayor número de instalaciones fotovoltaicas. Además, la temperatura promedio anual de 19° C resulta también muy favorable ya que la temperatura ideal para el funcionamiento de una celda de silicio no debe exceder los 25° C. Por otra parte es una ciudad en donde se consume una gran cantidad de energía y la incorporación de los sistemas fotovoltaicos permitirá reducir dicho consumo.

Actualmente, debido al costo de la tecnología, la integración de un sistema fotovoltaico para generar una fracción del consumo eléctrico de una vivienda es posible, pero implica una inversión elevada. La duración está garantizada hasta por 25 años logrando una recuperación de la inversión en un período aproximado de 10 años, siempre y cuando se de un correcto mantenimiento al sistema. Si se instalara un sistema que suministre el total de la energía demandada, con la eficiencia actual de los módulos, sería posible tener una vivienda autosuficiente, como la mostrada en el capítulo 5, sin embargo, el costo sería inaccesible.

Es importante analizar la energía que se consume y entender que es posible reducir dicho consumo, si se hace de manera responsable. Una forma de hacerlo es mediante el uso de lámparas ahorradoras y aparatos eficientes, de esta manera se puede disminuir la demanda de electricidad hasta un 25% y así las dimensiones de la instalación fotovoltaica se reducirán.

El estudio de la zona donde se colocará el sistema es otra pieza muy importante para una instalación adecuada, realizar un análisis de la radiación solar para un correcto dimensionado y una correcta orientación e inclinación, así como, aprovechar todas las áreas disponibles e integrar el sistema desde el inicio del proyecto y gracias a su modularidad la instalación puede ir creciendo de acuerdo a las necesidades.

Una de las ventajas de los sistemas fotovoltaicos es que son pequeñas unidades de generación cerca del punto de consumo, La energía generada durante el día puede ser utilizada durante la noche mediante baterías y los sobrantes del día se inyectan a la red eléctrica. La opción más económica es la que está conectada a la red, además de ser más eficiente debido a que hay menos pérdidas al no utilizar baterías.

El comportamiento de los sistemas fotovoltaicos en diferentes países muestra una tendencia hacia un mayor número de sistemas conectados a la red, que permite reducir los picos de demanda de las centrales eléctricas. Este tipo de instalación requiere del apoyo de instituciones gubernamentales, además, en el caso de México se necesita de un marco jurídico más

completo ya que no existe una normatividad específica para su instalación, solo el contrato de interconexión para fuentes de energía a pequeña escala, que permite poner la energía a disposición de la Comisión Federal de Electricidad o de Luz y Fuerza del Centro por medio de un medidor bidireccional.

Sin embargo no se permite la compra venta de energía eléctrica y la iniciativa de Ley para el Aprovechamiento de las Fuentes Renovables de Energía sigue sin ser aprobada, ésta iniciativa propone una mayor participación de dichas fuentes de energía y que el sistema eléctrico nacional debe aceptar el intercambio de energía producida por los particulares.

La generación fotovoltaica presenta algunos problemas, como no ser constante debido a las condiciones climatológicas, además de que el refinamiento del silicio requiere de una gran cantidad de energía, aunque, comparado con otras formas de generación de energía, el consumo es menor. Por otra parte la fabricación de algunos tipos de celdas requiere del manejo de sustancias tóxicas y las baterías representan un residuo contaminante, es un componente del sistema que no se ha desarrollado eficazmente.

Las instalaciones fotovoltaicas no son económicamente competitivas para aplicaciones de escala media y grande, los costos son variables y dependen del sitio donde se instalan. La temperatura ambiente y el porcentaje de irradiación son factores que afectan la producción de energía, a mayores niveles de irradiación el costo de inversión disminuye y viceversa.

La mayor parte de la investigación busca mejorar la eficiencia y reducir los costos de producción lo que se traduce en menos área y sistemas de menores dimensiones. Se ha avanzado en el uso de materiales de película delgada que aun siendo de más bajo rendimiento permiten mayores posibilidades estéticas y pueden aplicarse sobre una gran variedad de superficies y cubrir áreas más grandes. El silicio amorfo presenta mayor rendimiento en situaciones desfavorables de baja radiación, como es el caso de la iluminación difusa o sombras, además de que su eficiencia no se ve alterada por las bajas temperaturas.

Las actividades de desarrollo y tecnología realizan estudios relacionados con la nanotecnología y los polímeros conductores, aun no se logran eficiencias que puedan ser usadas comercialmente, son tecnologías en desarrollo y con el tiempo se espera que mejoren su eficiencia y que el costo de fabricación sea mucho menor que el de las de silicio utilizado actualmente. En general los costos continúan disminuyendo, sin embargo, la producción esta controlada por los países industrializados y mientras se siga importando la tecnología el costo no disminuirá significativamente.

Finalmente hay que tener en cuenta que el uso de la energía solar para la generación de electricidad aporta un ahorro y es importante su uso en viviendas, pero es solo una parte de un conjunto de acciones que se deben de tomar para obtener viviendas sustentables, como el análisis del consumo energético, un diseño bioclimático, la incorporación de nuevas tecnologías o la iluminación natural; no es la solución sino una pieza que ayudará a reducir el problema de las emisiones de bióxido de carbono a la atmósfera, junto con un uso racional de los recursos y el respeto por la naturaleza.

Su uso por el momento representa un pequeño beneficio económico en áreas urbanas, sin embargo también representa un beneficio ambiental y es más importante pensar en el bienestar humano que en el económico, que se dará con el tiempo gracias a los avances tecnológicos.

BIBLIOGRAFÍA

- ALCOR CABRERIZO, Enrique “Instalaciones solares fotovoltaicas”. 3ª. Edición. España: Progensa 2002
- ANTHONY, Falk, DÜRSCHNER, Christian. “Fotovoltaica para profesionales. Diseño instalación y comercialización de plantas solares fotovoltaicas”. Progensa, Sevilla, España. 2006
- BARBOSA Fabio, DOMINGUEZ Nicolas. “Situación de las reservas y el potencial petrolero de México.” Economía UNAM [en línea] Vol.3 No.7. Enero 2006. Disponible en: <http://www.ejournal.unam.mx/ecu/ecunam7/ecunam0705.pdf>. ISSN: 1665-952X
- BEHLING, Sophia, BEHLING Stefan y SCHINDLER, Bruno. “Sol Power”. Editorial Gustavo Gili, S.A. Barcelona, 2002
- CASTAÑAR MUÑOZ, Luis. “Energía Solar Fotovoltaica” Ediciones UPC. Universitat Politècnica de Catalunya. 1994
- EDWARDS, Brian. “Guía Básica de Sostenibilidad”. Versión castellana de Sandra Sanmiguel Sousa. Editorial Gustavo Gili S.A., Barcelona 2004
- ESTRADA CAJIGAL RAMÍREZ, Vicente, ALMANZA SALGADO, Rafael. “Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, en la República Mexicana.” SID/646 Instituto de Ingeniería. UNAM, Mayo 2005. ISBN: 970-32-2661-2
- “ESTRATEGIA NACIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO.” México 2007. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Mayo 2007. ISBN: 968-817-837-3
- GODET, Michel. “De la anticipación a la acción: manual de prospectiva y estrategia”. México Alfaomega 1995.
- GREEN, Martin. “Energía Fotovoltaica. De la luz solar a la electricidad usando células solares”. Zaragoza, España, Acribia 2002.
- HERMOSILLO VILLALOBOS, Juan Jorge. “Notas sobre el curso de Energía Solar”. Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Occidente (ITESO). Jalisco 1995.
- IBÁÑEZ PLANA M. “Tecnología Solar. Colección Energías Renovables”. Ediciones Mundi-Prensa Madrid, Barcelona, México. 2005
- “Las Reservas de Hidrocarburos de México. Evaluación al 1º de enero de 2008”. PEMEX. Exploración y Producción. ISBN: 978-968-5173-14-8
- “LEY DEL SERVICIO PÚBLICO DE ENERGÍA ELÉCTRICA”
- MULGRAVE, Victoria, “Designing with solar power: a source book for building integrated photovoltaics (BIPV).” London Earthscan, 2005
- SENER. Balance nacional de energía 2006
- REGLAMENTO DE LA LEY DEL SERVICIO PUBLICO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

- ROAF, Sue. FUENTES, Manuel. THOMAS, Stephanie. "Ecohouse a Design Guide". Architectural Press. Linacre House, Jordan Hill, Oxford. 2001.
- TOMAS, Buch. "El Tecnoscopio". Ed. Aique, Argentina. 1990

TESIS

- AMANTE VILLASEÑOR, Francisco. Metodología para el Diseño de Arquitectura ecológica. UNAM 2002
- NEGRETE MARES, Anabel. Estrategia de acondicionamiento natural para el ahorro de energía en el sector residencial. Caso de estudio Monterrey
- ROMO ZAMUDIO, Carlos Eduardo. La arquitectura solar en México: consideraciones tecnológicas para su enseñanza en instituciones de educación superior
- VAZQUEZ TORRES, Claudia Erendira. Estrategia teórica para introducir energía solar fotovoltaica en una vivienda de interés social en León, Guanajuato. UNAM 2007

BOLETINES Y REVISTAS ELECTRÓNICAS

- AGREDANO DÍAZ, Jaime "Prospectiva de la Tecnología Solar Fotovoltaica para la Generación de Electricidad". Instituto de Investigaciones Eléctricas. División de Energías Alternas, gerencia de energías no convencionales.
- AGREDANO D, Jaime. HUACUZ V, Jorge M. Internacional Energy Agency. Co-operative Programme on Photovoltaic Power Systems. Task 1. Exchange and dissemination of information on PV power systems. National Survey Report of PV Power Applications in México 2002. IIE, Temixco Mor. México, July 2003.
- "BP STATICS REVIEW OF WORLD ENERGY." Junio 2008. Disponible en <http://www.bp.com>
- "Dictamen de la comisión de energía a la iniciativa que crea la ley para el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía"
- ELVIS F. MENDIETA, Melchor. "Energía Solar y Arquitectura", Disponible en <http://www.revista.unam.mx/vol.3/num1/art2/index.html>
- FUENTES FREIXANET, Víctor Armando, "Nuevas Tecnologías en la arquitectura bioclimática, Tecnología y diseño en las edificaciones" Disponible en: <http://www-azc.uam.mx/cyad/procesos/website/grupos/tde/NewFiles/bioclimatica.html>, Ed. U. A. M. -A., 1998, México, D. F., ISBN. 970654711 - 8, Pp. 135 - 162.
- Gobierno del Estado de Baja California. "Sistemas Fotovoltaicos conectados a la Red Eléctrica". Disponible en <http://genc.iie.org.mx>
- GONZÁLEZ G, Raúl. JIMÉNEZ G, Humberto R. y LAGUNAS M, Javier. "Sistemas fotovoltaicos conectados a la red" Boletín IIE, octubre-diciembre del 2003
- HUACUZ VILLAMAR, Jorge M. "Energías renovables, base para un esquema de generación distribuida." Boletín del Instituto de Investigaciones Eléctricas., julio/agosto 2000

- HUACUZ VILLAMAR, Jorge M. “Energías renovables en la oferta energética nacional.” Boletín del Instituto de Investigaciones Eléctricas., septiembre/octubre 1999.
- “INFORME BRUNDTLAND, 1987.” Comisión Mundial del Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas
- “INVENTARIO MUNDIAL DEL PETRÓLEO USGS 2000 (U.S. Geological Survey).” Disponible en <http://www.usgs.gov>
- “INVENTARIO NACIONAL DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO 1990-2002 MÉXICO.” Secretaría de Medio Ambiente y Recurso Naturales. Instituto Nacional de Ecología.
- INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA. México ante el cambio climático. Disponible en: <http://www.ine.gob.mx/-ueajei/publicaciones/gacetitas/154/cclimatico.html>
- LUQUE, Antonio. SALA, Gabriel. “La investigación y el desarrollo fotovoltaico en España” Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid, <http://www.censolar.es/articu04.htm>
- “REPORTE DE LA ENCUESTA NACIONAL DE APLICACIONES FOTOVOLTAICAS EN MÉXICO, 2002 IEA-PVPS Task 1”. Disponible en <http://www.iea-pvps.org>
- SÁNCHEZ JUÁREZ, Aarón. Tecnologías Fotovoltaicas. Estado Actual y Futuro Solar. Departamento de Materiales Solares. CIE UNAM, Edición 2007
- SENER. “Prospectiva del Sector Eléctrico” 2007-2016
- ŠŮRI M.,[et al.], 2007. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. Solar Energy, 81, 1295-1305, Disponible en <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>.
- URKIA, Iñaki. VILCHES, Manolo. “Introducción a la arquitectura bioclimática y temas ambientales relacionados”. Disponible en: http://www.unizar.es/med_naturista/arquitectura%20bioclimatica_completo.pdf
- VILLAVICENCIO BLANCO, Judith. DURAN CONTRERAS, Ana María. “Treinta años de vivienda social en la ciudad de México: nuevas necesidades y demandas” Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales. Universidad de Barcelona. ISSN: 1138-9788. Depósito Legal B. 21.741-98 Vol. VII, num. 146(028), 1 de agosto de 2003 [http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-146\(028\).htm](http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-146(028).htm)

SITIOS DE INTERNET

- BEAR ARCHITECTEN. Disponible en: <http://www.bear.nl/>
- COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. (CFE). Disponible en: <http://www.cfe.gob.mx>
- COMISIÓN NACIONAL PARA EL AHORRO DE ENERGÍA (CONAE) Disponible en: <http://conae.gob.mx>.

- CRISIS ENERGÉTICA. Disponible en: <http://www.crisisenergetica.org>
- Grupo IDEA © 2005 I+D en energía Solar y Automática Cursolar, Disponible en: <http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/index.htm>
- INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELÉCTRICAS. (IIE). Disponible en : <http://www.iie.org.mx>
- INSTITUTO DEL FONDO NACIONAL DE LA VIVIENDA PARA LOS TRABAJADORES (INFONAVIT). Disponible en: <http://www.infonavit.gob.mx>
- INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO. IMP. Disponible en: <http://www.imp.mx>
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME. (IEA-PVPS). Disponible en: <http://www.iea-pvps.org/index.html>.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Working group I: The physical Basis of Climate Change. Disponible en <http://www.ipcc.ch>
- LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN PROSPECTIVA ESTRATÉGICA Y ORGANIZACIÓN. Los programas de prospectiva estratégica. Disponible en http://www.3ie.fr/lipsor_es/index_es.htm
- LUZ Y FUERZA DEL CENTRO (LFC). Disponible en: http://www.lfc.gob.mx/tarifas/tarifa_1.htm
- NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. Disponible en: <http://nrel.gov>
- PHOTOVOLTAICS SYSTEMS. Disponible en : <http://www.pvresources.com>
- SECRETARIA DE ENERGÍA (SENER). Disponible en: <http://www.energia.gob.mx/wb/>
- Solarbuzz, LLC. Solar Module Price Highlights. Disponible en <http://www.solarbuzz.com>
- "Surface meteorology and Solar Energy". Disponible en <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>
<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- TODO SOLAR. Disponible en: <http://www.todosolar.com>
- US. Department of Energy. Solar Energy Technologies Program. Disponible en <http://www.energy.gov/solar/>
- WHOLE BUILDING DESIGN GUIDE. Disponible en: <http://www.wbdg.org/design>

GLOSARIO DE TÉRMINOS.

Arreglo fotovoltaico: Consiste de varios módulos agrupados y conectados en serie, posteriormente se conectan en paralelo con el fin de producir la potencia necesaria con las características de corriente y voltaje requeridas en una aplicación dada

Celdas fotovoltaicas: Unidad básica y más pequeña de un sistema fotovoltaico: En general se clasifican como cristalinas (mono o policristalinas) o películas delgadas. La mayoría de las celdas están hechas de silicio de forma cuadrada con tamaños entre los 10 y 15cm.

Efecto Fotovoltaico: Es un fenómeno físico que consiste en la conversión de la energía que transporta la radiación electromagnética (luz visible o ultravioleta en general) en energía eléctrica.

Irradiación (G): Es la energía solar recibida por unidad de superficie durante un tiempo determinado; es por consiguiente la integral de la irradiancia en el tiempo establecido. Sus unidades son de energía, siendo las más frecuentes:

MJ/m²

Langley (1 Langley = 41.86 kJ/m²)

kWh/m² = (1 kWh/m² = 3.6 MJ/m²)

Irradiancia (I): Es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética en una unidad de tiempo. En unidades del sistema internacional se mide en W/m².

Módulos fotovoltaicos: Son fabricados con potencias que van desde los 50W hasta 200W. Consisten en celdas conectadas eléctricamente y encapsuladas entre un material transparente y un material plástico en la parte posterior. Los módulos de película delgada es un material delgado que se encapsula para formar módulos flexibles con material transparente en la parte frontal.

Radiación electromagnética: Combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes y perpendiculares entre sí, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro.

Semiconductor: Es una sustancia que se comporta como conductor o como aislante dependiendo del el campo eléctrico en el que se encuentre. Ejemplos: silicio (Si), cadmio (Cd), indio (In), telurio (Te), selenio (Se), entre otros.

Sistemas conectados a red: Los componentes básicos de éste tipo de sistemas son: el generador fotovoltaico que convierte la luz del sol directamente en energía eléctrica en corriente directa y un inversor de corriente.

Sistema solar fotovoltaico: Es aquel que comprende alguno o todos los subsistemas siguientes: subsistema fotovoltaico, subsistema de almacenamiento, subsistema de regulación de carga, subsistema de conversión, subsistema de monitorización y registro.