



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**UTILIZACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN
MÉXICO: HACIA UNA TRANSICIÓN EN LA
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO- ELECTRÓNICO**

PRESENTA

EDGAR LÓPEZ SATOW

ASESOR DE TESIS

DR. ALBERTO ELIZALDE BALTIERRA



MÉXICO, D. F.

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.

Índice

Introducción General	1
1. Tecnologías convencionales de generación de energía eléctrica	7
Introducción	9
1.1 <i>Con fuentes de energía no renovables</i>	10
1.1.1 <i>Centrales termoeléctricas convencionales</i>	10
1.1.1.1 <i>Carboeléctricas</i>	11
1.1.1.2 <i>Duales</i>	12
1.1.1.3 <i>Turbogás</i>	13
1.1.1.4 <i>Combustión interna</i>	14
1.1.1.5 <i>Ciclo combinado</i>	15
1.1.1.6 <i>Nucleoeléctricas</i>	17
1.2 <i>Con fuentes de energía renovables</i>	18
1.2.1 <i>Hidroeléctricas</i>	18
1.2.1.1 <i>Hidroeléctrica de agua corriente</i>	19
1.2.1.2 <i>Hidroeléctrica con vaso de almacenamiento</i>	19
1.2.1.3 <i>Hidroeléctrica de bombeo</i>	20
1.2.1.4 <i>Maremotrices</i>	20
1.2.2 <i>Geotermoeléctricas</i>	21
1.2.3 <i>Solares</i>	22
1.2.3.1 <i>Centrales fotovoltaicas</i>	22
1.2.3.2 <i>Centrales fototérmicas</i>	23
1.2.4 <i>Eoloeléctrica</i>	25
Conclusiones	27
2. Experiencias Internacionales en el uso de las energías renovables para la generación de energía eléctrica	29
Introducción	31
2.1 <i>España</i>	32
2.1.1 <i>Políticas públicas y marco regulatorio</i>	32
2.1.1.1 <i>Evolución histórica</i>	32
2.1.1.2 <i>Situación actual</i>	34

a)	<i>Libro Blanco de la Unión Europea</i>	34
b)	<i>Directiva 2001/77/CE del Parlamento Europeo y del Consejo</i>	35
c)	<i>Ley del Sector Eléctrico</i>	35
d)	<i>Plan de Energías Renovables 2005-2010</i>	36
e)	<i>Resolución de 11 de febrero de 2005</i>	36
2.1.2	<i>Estrategias seguidas</i>	37
2.1.2.1	<i>Plan de Energías Renovables (PER) 1986</i>	37
2.1.2.2	<i>Plan Energético Nacional (PEN) 1991 – 2000</i>	37
2.1.2.3	<i>Plan de Fomento de Energías Renovables 2005 – 2010</i>	39
2.1.3	<i>Capacidad instalada</i>	39
2.1.3.1	<i>Energía eólica</i>	39
a)	<i>Evolución histórica y situación actual</i>	39
2.1.3.2	<i>Energía solar</i>	40
a)	<i>Evolución histórica y situación actual</i>	40
2.2	<i>Alemania</i>	42
2.2.1	<i>Políticas públicas y marco regulatorio</i>	42
2.2.1.1	<i>Evolución histórica</i>	42
2.2.1.2	<i>Situación actual</i>	44
a)	<i>Ley de Energías Renovables (Erneuerbare – Energien – Gesetz EEG)</i>	44
b)	<i>Eco – Tax Reform</i>	45
2.2.2	<i>Estrategias seguidas</i>	46
2.2.2.1	<i>250 MW Wind Programme</i>	47
2.2.2.2	<i>ERP – Environment and Energy – Saving Programme</i>	48
2.2.2.3	<i>1'000,000 Roofs Programme</i>	48
2.2.2.4	<i>Solarthermie 2,000 plus</i>	48
2.2.2.5	<i>Home Grant (Eigenheimzulage)</i>	49
2.2.2.6	<i>Market Simulation Programme</i>	49
2.2.2.7	<i>Green Electricity</i>	50
2.2.2.8	<i>Investing in the Future Programme</i>	50
2.2.3	<i>Capacidad instalada</i>	50
2.2.3.1	<i>Energía eólica</i>	50
a)	<i>Evolución histórica y situación actual</i>	50

2.2.3.2	<i>Energía solar</i>	52
	a) <i>Evolución histórica y situación actual</i>	52
2.3	<i>Estados Unidos</i>	54
2.3.1	<i>Políticas públicas y marco regulatorio</i>	54
2.3.1.1	<i>Evolución histórica</i>	54
2.3.1.2	<i>Situación actual</i>	58
	a) <i>Public Utility Regulatory Policies Act (PURPA)</i>	58
	b) <i>Renewable Portfolio Standard (RPS)</i>	58
	c) <i>Energy Tax Act of 1978</i>	58
	d) <i>Tax Reform Act 1986</i>	59
	e) <i>Energy Policy Act (EPAAct) of 2005</i>	59
2.3.2	<i>Estrategias seguidas</i>	60
2.3.2.1	<i>Solar Energy Research Act</i>	60
2.3.2.2	<i>Solar Heating and Cooling Demonstration Act</i>	60
2.3.2.3	<i>Solar Photovoltaic Energy Research, Development and Demonstration Act</i>	61
2.3.2.4	<i>Wind Energy Systems Act of 1980</i>	61
2.3.2.5	<i>Economic Recovery Act of 1981</i>	61
2.3.2.6	<i>Energy Efficiency & Renewable Energy Development</i>	61
2.3.2.7	<i>Tax Relief Extension Act 1999</i>	62
2.3.2.8	<i>Energy for the New Millennium: National Photovoltaics Program Plan</i>	62
2.3.2.9	<i>Funding to accelerate the use of Wind Energy – Information Campaigns</i>	62
2.3.3	<i>Capacidad instalada</i>	62
2.3.3.1	<i>Energía eólica</i>	63
	a) <i>Evolución histórica y situación actual</i>	63
2.3.3.2	<i>Energía solar</i>	64
	b) <i>Evolución histórica y situación actual</i>	64
	<i>Conclusiones</i>	67

3. Potencial de recursos energéticos eólicos y solares en México para la generación de energía eléctrica	69
Introducción	71
3.1 Recursos energéticos eólicos y solares	72
3.1.1 Metodología general para la evaluación de recursos eólicos	72
3.1.1.1 Descripción general de la metodología	72
3.1.1.2 Medición del viento	73
a) Espectro Energético del Viento, $S_d(f)$ (Auto Power Spectral Density, APSD)	74
3.1.1.3 Evaluación y análisis de datos	75
a) Velocidad media del viento	76
b) Desviación estándar	76
c) Energía eólica disponible en el período, por unidad de área	76
d) Densidad de potencia promedio en el período	77
e) Histograma de velocidades del viento	77
f) Patrón diario de velocidad de viento	78
3.1.1.4 Clasificación del potencial eólico	78
a) Función de densidad de probabilidad de Weibull	79
3.1.1.5 Sistema de mapeo	81
a) Modelo Digital de Elevación (DEM)	81
b) Datos meteorológicos	82
c) Densidad de potencia eólica	82
3.1.2 Metodología general para la evaluación de recursos solares	84
3.1.2.1 Descripción general de la metodología	84
3.1.2.2 Medición de parámetros meteorológicos	85
3.1.2.3 Obtención de datos de radiación	85
a) Radiación solar global sobre superficies horizontales	85
b) Radiación solar difusa sobre superficies horizontales	87
c) Radiación solar directa sobre superficies horizontales	88
3.1.2.4 Sistema de mapeo	89
a) Método geoestadístico de interpolación de kriging	89
3.2 Recursos eólicos en México	90
3.2.1 Regiones con recursos eólicos	90

3.2.2	<i>Evaluación de los recursos eólicos</i>	92
3.2.2.1	<i>Corredor Eólico del Istmo de Tehuantepec</i>	93
3.3	<i>Recursos solares en México</i>	100
3.3.1	<i>Regiones con recursos solares</i>	100
3.3.2	<i>Evaluación de los recursos solares</i>	101
	Conclusiones	107
4.	Evolución histórica y situación actual de la utilización de energías renovables para la generar energía eléctrica en México	109
	Introducción	111
4.1	<i>Políticas públicas y marco regulatorio</i>	112
4.1.1	<i>Evolución histórica</i>	112
4.1.2	<i>Situación actual</i>	115
4.1.3	<i>Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE)</i>	120
4.1.3.1	<i>Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica</i>	122
4.1.4	<i>Ley de la Comisión Reguladora de Energía</i>	123
4.1.5	<i>Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética</i>	124
4.2	<i>Incentivos para desarrollar proyectos con energías renovables</i>	126
4.2.1	<i>Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética</i>	126
4.2.2	<i>Fondo verde</i>	127
4.2.3	<i>Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL)</i>	128
4.2.4	<i>Programa de Energías Renovables a Gran Escala (PERGE)</i>	129
4.2.5	<i>Temporada Abierta</i>	130
4.2.6	<i>Programa para la Promoción de Calentadores Solares de Agua en México (PROCASOL)</i>	132
4.3	<i>Evolución histórica y situación actual</i>	133
4.3.1	<i>Capacidad instalada</i>	133
4.3.1.1	<i>Energía eólica</i>	133
4.3.1.2	<i>Energía solar</i>	136
a)	<i>Sistemas fotovoltaicos</i>	136
b)	<i>Sistemas fototérmicos</i>	137

<i>4.4 Proyectos comprometidos</i>	139
Conclusiones	141
5. Hacia una transición a las energías renovables para la generación de energía eléctrica en México	143
Introducción	145
<i>5.1 Energía primaria empleada para generar energía eléctrica para el sector público en el periodo 1965 – 2007</i>	146
5.1.1 <i>Metodología de análisis</i>	146
5.1.2 <i>Resultados: Definición de eras</i>	148
<i>5.2 Análisis del periodo 1965 – 2007</i>	151
5.2.1 <i>Era de la Hidroenergía: 1965 – 1975</i>	151
5.2.2 <i>Era del Combustóleo: 1976 – 2003</i>	152
5.2.3 <i>Era del Gas Natural: 2004 - 2007</i>	153
<i>5.3 Análisis del periodo 2008 – 2018: uso más extensivo del gas natural</i>	154
<i>5.4 ¿Hacia una transición encaminada a las energías renovables?</i>	162
Conclusiones	169
 <i>Conclusiones Generales</i>	 173
 <i>Referencias</i>	 181
 Índice de Anexos	
 III.1 Características del viento	 191
III.2 Radiación solar	193
III.3 Recurso eólico en México	195
III.4 Mapas de isohelias de irradiación global diario promedio mensual	199
III.5 Irradiación global media	205

Índice de Figuras

I.1 Central termoeléctrica convencional	10
I.2 Central carboeléctrica	11
I.3 Central turbogás	13
I.4 Central de combustión interna	14
I.5 Central de ciclo combinado	16
I.6 Central nucleoelectrica	17
I.7 Central hidroeléctrica	19
I.8 Central geotermoeléctrica	21
I.9 Central solar fotovoltaica	23
I.10 Central solar fototérmica	24
I.11 Central eoloelectrica	26
II. 1 Evolución de la generación total de energía renovable y las políticas a través del tiempo (España)	34
II.2 Evolución anual de la capacidad eólica instalada (España)	40
II.3 Evolución de la capacidad instalada con tecnología fotovoltaica (España)	41
II.4 Evolución de la capacidad instalada con tecnología fototérmica (España)	42
II.5 Evolución de la generación total de energía renovable y las políticas a través del tiempo (Alemania)	43
II.6 Evolución de la energía eólica (Alemania)	51
II.7 Evolución de la energía fototérmica (Alemania)	53
II.8 Evolución de la energía fotovoltaica (Alemania)	54
II.9 Evolución de la generación total de energía renovable y las políticas a través del tiempo (Estados Unidos)	57
II.10 Evolución de la capacidad instalada eólica (Estados Unidos)	64
II.11 Evolución de la energía fototérmica (Estados Unidos)	65
II.12 Evolución de la energía fotovoltaica (Estados Unidos)	66
III.1 Metodología general para la evaluación de recursos eólicos	73
III.2 Espectro energético del viento	75
III.3 Ejemplo del histograma de velocidad de viento para un período mensual	77
III.4 Ejemplo del patrón diario de velocidad de viento para un período mensual	78
III.5 Ejemplo de una familia de curvas de la función de densidad de probabilidad de Weibull para una velocidad media de 8 m/s	80

III.6 Representación tipo malla en vista isométrica y Representación en dos dimensiones por medio de tonos	82
III.7 Densidad de potencia eólica (para una densidad del aire igual a 1.225 kg/m ³)	83
III.8 Metodología general para la evaluación de recursos solar	84
III.9 Comparación de diferentes modelos de radiación difusa	88
III.10 Regiones principales con recursos eólicos	92
III.11 Regiones principales con recursos eólicos	94
III.12 Resultados obtenidos en La Mata, Oaxaca	94
III.13 Resultados obtenidos en Rancho Salinas, Oaxaca	95
III.14 Resultados obtenidos en Santo Domingo, Oaxaca	95
III.15 Velocidad media del viento a 32 m de altura sobre el nivel del terreno	96
III.16 Velocidad media del viento a 32 m de altura sobre el nivel del terreno	97
III.17 Distribución de velocidad por rumbos	98
III.18 Función de densidad de probabilidad	99
III.19 Densidad de potencia	99
III.20 Promedio anual de irradiación global	101
III.21 Irradiación global diaria promedio mensual (MJm ⁻²), en julio	103
IV.1 Ordenamientos jurídicos que rigen las actividades del sector eléctrico	116
IV.2 Modalidades de permisos e instrumentos de regulación	117
IV.3 Infraestructura de transmisión por Temporada Abierta	131
IV.4 Capacidad Instalada en México (1994 a 2008)	136
IV.5 Metros cuadrados de calentadores solares instalados en México (1993 a 2004)	138
V.1 Metodología para el análisis de energía primaria empleada para generar energía eléctrica	146
V.2 Evolución de la energía primaria destinada a transformación de energía eléctrica para el servicio público	148
V.3 Evolución de la energía destinada a transformación de energía eléctrica: Definición de eras	150
V.4 Participación de tecnologías en la capacidad de generación en Servicio Público	159
V.5 Prospectiva de la energía destinada a transformación de energía eléctrica 2008 - 2017	161
V.6 Energía destinada a transformación de energía eléctrica periodo: 2007 – 2017	162

Índice de Tablas

III.1 Clasificación del recurso eólico (50 m de altura, $k= 2$)	79
IV.1 Contenido general del RLSPEE	123
IV.2 Proyectos MDL con energía eólica en México	129
IV.3 Proyectos de parques eólicos del sector público a instalarse en 2007-2010	139
IV.4 Proyectos de autoabastecimiento que usarán líneas de transmisión actuales	139
IV. 5 Parques eólicos de la minitemporada abierta, a instalarse en diciembre de 2008	140
IV. 6 Parques eólicos a instalarse en 2010, producto de la temporada abierta	140
V.1 Análisis de los principales factores determinantes para el predominio del energético	163
V.2 Análisis de los principales factores determinantes para el posible predominio de la energía eólica	164

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

Introducción General

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

Introducción General

Históricamente, México ha sido un país eminentemente petrolero. Anualmente, el Balance Nacional de Energía, muestra la evolución del Sector Energético mediante el análisis de sus principales variables. En él se establece que la gran mayoría de la producción de energía primaria se da mediante el consumo de hidrocarburos como el petróleo, gas natural y condensados, y se espera que esta tendencia se mantenga por algunos años más.

En relación con uno de los sectores fundamentales en el desarrollo del país, el de la generación de energía eléctrica, históricamente también se encuentran los hidrocarburos como la principal fuente de energía primaria. Actualmente, las energías renovables empiezan a tener un buen grado de integración; sin embargo sigue siendo una opción poco recurrida ya que no había las condiciones necesarias para el desarrollo e implementación de proyectos utilizando este tipo de energía.

En cuestión del marco regulatorio, las reformas a la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica han favorecido desde 1992 la participación de la industria privada en la generación de energía eléctrica para actividades que no constituyan servicio público. Se establecieron modalidades como el autoabastecimiento y la cogeneración para el consumo de los que están involucrados en el proyecto, y la producción independiente de energía para los proyectos cuyo fin es vender la energía eléctrica generada a la Comisión Federal de Electricidad (la CFE).

En el rubro de la generación de energía eléctrica para el servicio público mediante el uso de recursos renovables, por mandato constitucional, la CFE deberá aprovechar los bienes y recursos naturales con que cuenta el país, como pueden ser las grandes presas existentes, así como la energía nuclear, mientras que las demás formas de generación están permitidas en las modalidades autorizadas en la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica. Asimismo, la Comisión Reguladora de Energía (CRE) ha aprobado los instrumentos regulatorios necesarios para permitir a los particulares desarrollar proyectos de energías renovables, tales como el Contrato de Interconexión para Fuente de Energía Renovable y el Contrato de Interconexión para Fuente de Energía Solar en Pequeña Escala.

En la actualidad hay poca capacidad instalada para aprovechar la energía eólica y la solar; sin embargo con la aprobación de nuevos instrumentos regulatorios en los últimos años, se están estableciendo las condiciones para favorecer una mayor participación de estas energías en la

generación eléctrica. Tal es el caso de los proyectos de particulares que se están desarrollando en la zona del Istmo de Tehuantepec, que contemplan instalar en el período de 2008-2012 una capacidad aproximada de 2000 MW.

Por lo anterior, la problemática a abordar en esta tesis será:

- ¿El sector energético en México se encuentra en una etapa de transición hacia una mayor utilización de las energías renovables en la generación de energía eléctrica?
- ¿Cuáles son las causas que han originado tal situación?

Para dar respuesta a esta problemática se plantea una metodología que se desarrolla en cinco capítulos.

En el primer capítulo, se estudian las tecnologías convencionales para la generación de energía eléctrica, dividiéndolas en aquellas que utilizan fuentes de energía no renovable y las renovables. Las primeras están conformadas por las centrales termoeléctricas. Las segundas engloban las centrales hidroeléctricas, geotermoeléctricas, solares y eoloeeléctricas.

En el capítulo 2 se presentan las experiencias internacionales en el uso de energías renovables para la generación de energía eléctrica. En particular, se estudia la evolución de las políticas públicas, el marco regulatorio y la situación actual en torno a la utilización de recursos renovables eólicos y solares en la generación de electricidad en España, Alemania y Estados Unidos, haciendo especial énfasis en las lecciones que pueden arrojar sus experiencias.

En el capítulo 3, se aborda lo referente a la evaluación de los recursos energéticos eólicos y solares, basándose en una metodología general que ha sido utilizada en la evaluación del potencial de estos recursos en México. Se describen las diferentes regiones del país que cuentan con un potencial considerable, en donde la evaluación del recurso ha sido favorable. Es decir, se muestran los resultados obtenidos de los estudios que se han realizado a través del tiempo para la determinación del potencial eólico y solar en nuestro país.

La evolución histórica y la situación actual de la utilización de energías eólica y solar para generar energía eléctrica en México, se describe en el cuarto capítulo. Para ello, se estudia el marco regulatorio, donde encontramos los principales instrumentos que regulan al sector energético,

destacando la normatividad que ha apoyado y que fomentará el desarrollo del uso de tecnologías con energéticos alternativos.

También se tratan algunos incentivos que se han implementado para la promoción de uso de energías renovables, a través de programas y proyectos. Además, se presenta la situación actual en el país, mostrando la evolución de la capacidad instalada al paso del tiempo, para así poder hacer una comparación entre la evolución de ésta y la del marco regulatorio. Por último, se muestran los principales proyectos que ya se encuentran en desarrollo para los próximos diez años.

En el capítulo 5, se presenta el consumo de combustibles destinados a la generación de energía eléctrica, para el periodo 1965 – 2007 y 2008 – 2017. Para el primer periodo, se estudia la evolución que han tenido los combustibles a través del tiempo y se definen las eras correspondientes para el combustible predominante. En base a esto, se hace un análisis histórico para poder identificar las causas del por qué de la utilización de ciertos combustibles en específico. Posteriormente, se realiza un estudio para el periodo correspondiente al 2007 – 2017. Siguiendo el análisis anterior, y con información obtenida de la SENER, se presenta una prospectiva a diez años, en donde se analizan los principales factores que influyen en este resultado. Finalmente, en la última parte del capítulo, se presenta el estudio de los factores que están influyendo en la transición energética hacia el uso de las energías renovables en la generación de electricidad con el propósito de brindar elementos para intuir su futuro en los próximos años.

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

Capítulo 1

**Tecnologías convencionales de generación
de energía eléctrica**

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

1. Tecnologías convencionales de generación de energía eléctrica

Introducción

Las centrales generadoras se distinguen por las fuentes de energía que utilizan: las que generan a partir de recursos no renovables y las que lo hacen con recursos renovables. Las fuentes no renovables son las que pueden acabarse y que tardan periodos de tiempo muy largos para formarse de nuevo, como el petróleo, el carbón y el gas natural. Por el contrario, las fuentes renovables se recuperan en periodos de tiempos cortos, como son el aire, el agua, el sol y la geotermia.

Las fuentes no renovables son utilizadas en centrales termoeléctricas, las cuales tienen variantes según el combustible empleado, pero en general ocupan el mismo principio de generación. Este consiste en generar algún fluido (gas o vapor) que impulse una turbina que a la vez accione el generador acoplado a ella. Las centrales hidroeléctricas y eololéctricas ocupan también el mismo principio, pero el fluido que mueve a la turbina es una fuente renovable (agua o aire). La energía solar en cambio, utiliza la radiación solar para generar electricidad a través del calor de la radiación luminosa, o bien aprovecha la energía de los corpúsculos constituyentes de la luz en el efecto fotovoltaico.

Con la finalidad de conocer las características de las centrales eléctricas convencionales, en este capítulo se describen las principales tecnologías empleadas para la generación de energía eléctrica.

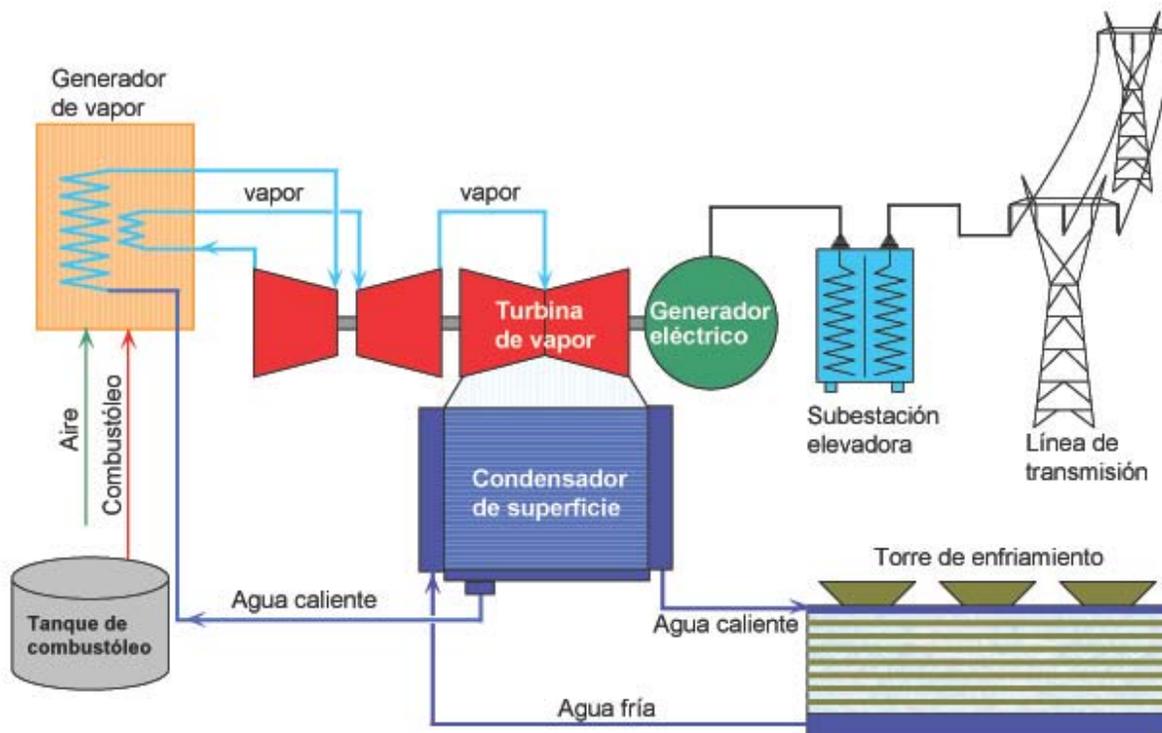
En la primera parte, se estudian las centrales que utilizan fuentes no renovables de energía, las cuales están conformadas por las diferentes centrales termoeléctricas. La segunda, se refiere a las centrales que utilizan fuentes renovables de energía: centrales hidroeléctricas, geotermoeléctricas, solares y eololéctricas.

1.1. Con fuentes de energía no renovable

1.1.1. Centrales termoeléctricas convencionales

Las centrales termoeléctricas convencionales, se caracterizan por utilizar como fuente primaria la energía química almacenada (poder calorífico) de un combustible. Dicha energía química disponible es liberada en la combustión que se lleva a cabo en la caldera, transformándose así en energía calorífica, la que es transmitida al agua para cambiar su estado líquido a vapor. El vapor es sobrecalentado o recalentado y se conduce a una turbina donde la energía térmica se transforma en cinética y posteriormente en mecánica, esto a través del movimiento de los álabes de la turbina, la que a su vez se acopla a un generador eléctrico que se encarga de transformar la energía mecánica en eléctrica. La Figura I.1 muestra un arreglo típico de una central termoeléctrica convencional o de vapor.

Figura I.1 Central termoeléctrica convencional



Fuente: CFE, 2005

Independientemente de cuál sea el combustible fósil que utilicen (combustóleo, carbón o gas), el esquema de funcionamiento de todas las centrales termoeléctricas convencionales es prácticamente

el mismo. Las únicas diferencias consisten en el distinto tratamiento previo que sufre el combustible antes de ser inyectado en la caldera y en el diseño de los quemadores de la misma, que varían según sea el tipo de combustible empleado (Beltrán y Urias, 2005).

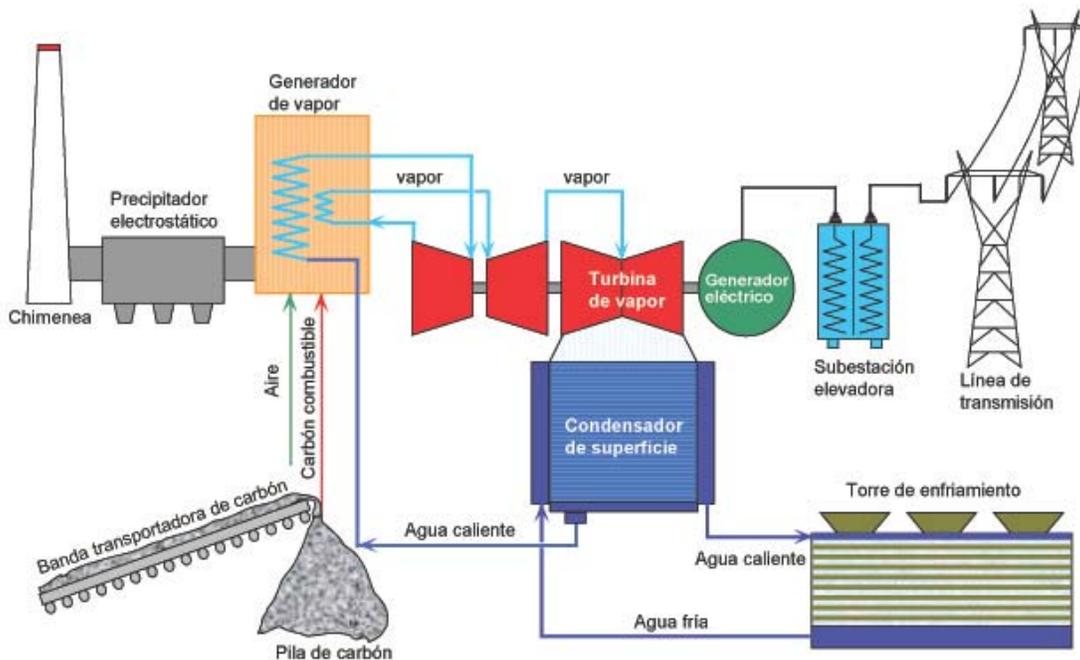
La CFE cuenta con 23 centrales termoeléctricas convencionales, la que cuenta con mayor capacidad instalada, es la central Pdte. Adolfo López Mateos (Tuxpan) ubicada en Tuxpan, Veracruz. Esta planta cuenta 6 unidades y una capacidad instalada de 2,100 MW, entró en operación en 1991 y es una de las más recientes de México.

1.1.1.1. Carboeléctricas

En las centrales carboeléctricas se utiliza el principio básico de una termoeléctrica convencional, no obstante se tienen diferencias importantes que hay que mencionar.

El uso del carbón pulverizado en lugar de combustóleo como energético primario, es una diferencia que implica un sistema de recibo y manejo del carbón, sistema de transporte de éste a las unidades generadoras, trituradores, pulverizadores, sistema de manejo y transporte de cenizas. En la Figura I.2, podemos observar cómo está constituida una central carboeléctrica.

Figura I.2 Central carboeléctrica



Fuente: CFE, 2005

De acuerdo con J.A. Martínez (1997), existen tres tipos de centrales carboeléctricas, las cuales son:

- Central carboeléctrica sin desulfurizador y sin quemadores duales, utilizando carbón con un alto contenido de cenizas (30 a 40%).
- Central carboeléctrica sin desulfurizador y con quemadores duales para carbón y combustóleo. El combustible primario es carbón con un contenido de azufre de 0.5%.
- Central carboeléctrica con desulfurizador y quemadores duales para carbón y combustóleo. El combustible primario es carbón con un contenido de azufre del 2%.

Cabe mencionar, que aunque el ciclo térmico de las centrales carboeléctricas no difiere del de las térmicas convencionales, las centrales carboeléctricas tienen un mayor rango de capacidades que van desde 20MW hasta más de 700MW.

La experiencia de CFE en centrales carboeléctricas proviene de la operación tanto de las cuatro unidades de 300 MW de la central José López Portillo (Río Escondido), como de las cuatro unidades de Carbón II de 350 MW cada una, ambas centrales ubicadas en Nava, Coahuila.

1.1.1.2. Duales

Esta clase de central utiliza como fuente energética primaria dos combustibles (combustóleo y carbón o combustóleo y gas), lo que le da la particularidad de ser “dual”.

Las centrales duales no presentan diferencias considerables comparadas con las termoeléctricas de vapor, la única diferencia radica en la caldera, ya que debe de tener la capacidad de poder utilizar ambos combustibles.

Actualmente en México, sólo se cuenta con una central de esta clase, la central Presidente Plutarco Elías Calles (Petacalco), localizada en el municipio La Unión, en el estado de Guerrero. En las instalaciones de esta central se cuenta con seis unidades generadoras, en operación con una capacidad nominal de 350 MW cada una, haciendo una capacidad instalada de 2,100 MW.

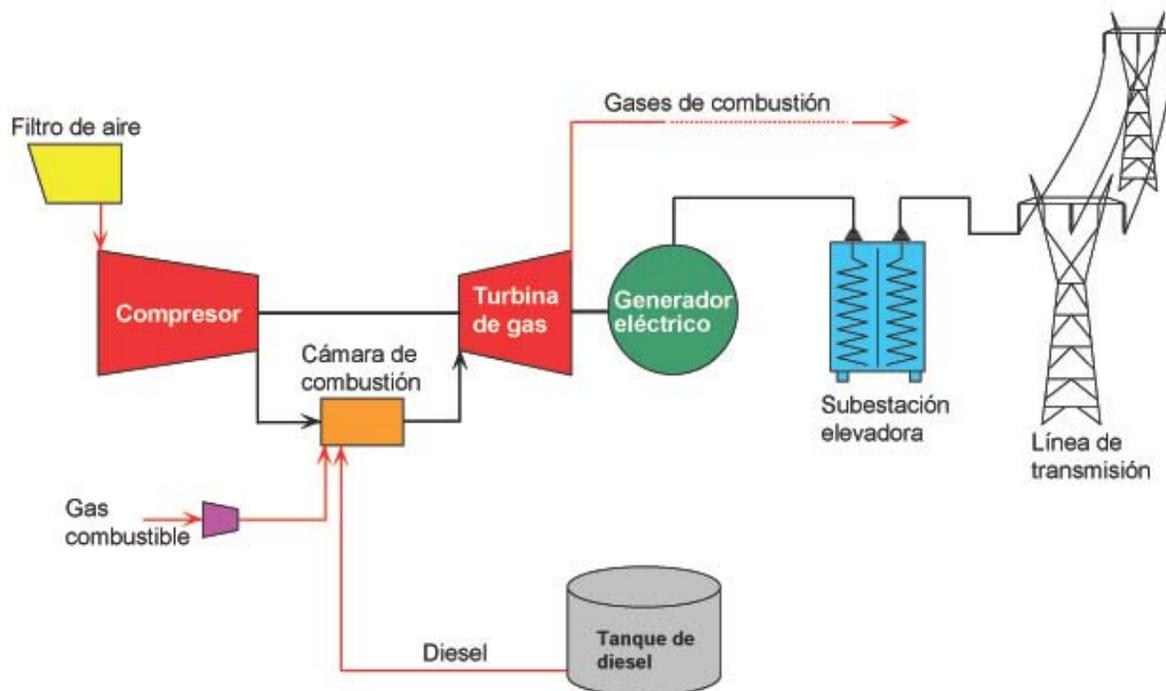
La central utiliza como combustible principal carbón importado, el cual es transportado en barcos. También se utiliza combustóleo pesado como combustible alternativo y diesel para los arranques.

1.1.1.3. Turbogás

La generación de energía eléctrica en las unidades de turbogás se logra aprovechando directamente, en los álabes de la turbina de gas, la energía cinética que resulta de la expansión de aire y gases de la combustión, comprimidos (Figura I.3).

El proceso comienza cuando el sistema toma aire fresco de la atmosfera a través de un filtro y entra después al compresor. El aire es comprimido aquí antes de llegar a la cámara de combustión, donde el combustible se mezcla con el aire altamente comprimido, quemándose posteriormente. De ello resultan gases de combustión calientes los cuales al expandirse hacen girar la turbina de gas, la cual está acoplada al generador eléctrico. Los gases producidos en la combustión, después de su expansión son descargados directamente a la atmósfera.

Figura I.3 Central turbogás



Fuente: CFE, 2005

Desde el punto de vista de operación, el breve tiempo de arranque y la versatilidad para seguir a la demanda hacen a las turbinas de gas ventajosas para satisfacer cargas en horas pico, aunque existen modelos de tecnologías avanzada que han sido diseñados para servicio de carga base y cogeneración industrial.

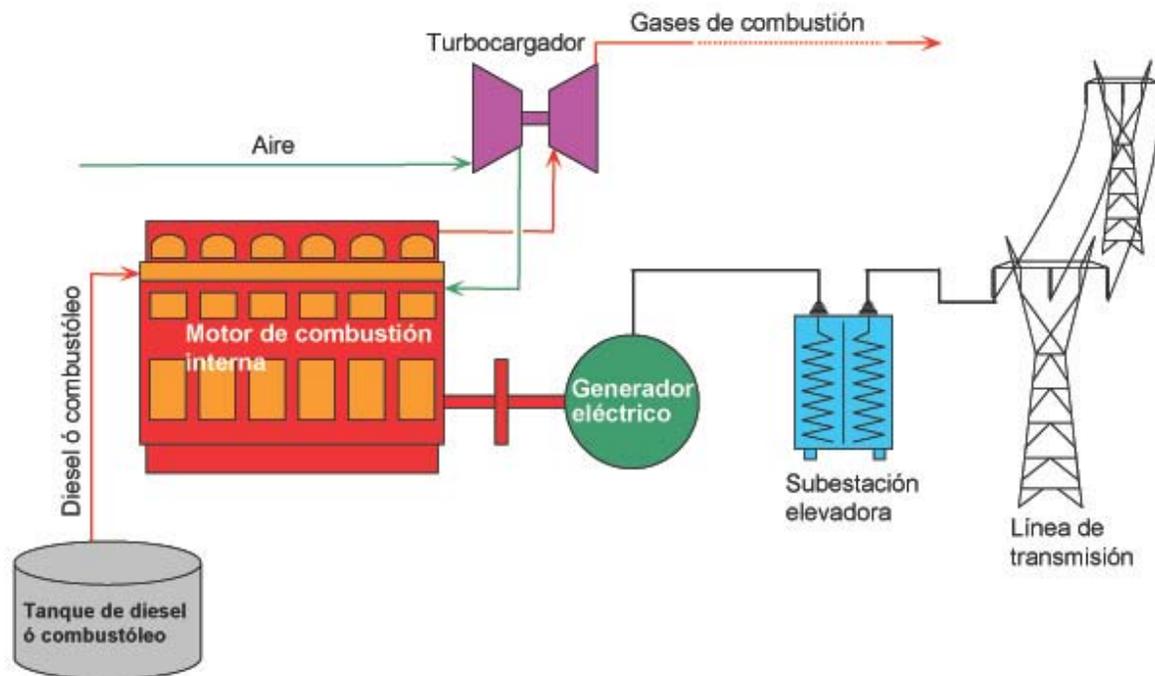
Estas unidades emplean como combustible gas natural o diesel en forma alternativa y en los modelos avanzados también pueden quemar combustóleo o petróleo crudo, teniendo efectos sobre la potencia y eficiencia.

La central generadora más importante de esta clase en nuestro país está ubicada en el municipio de Hermosillo, Sonora. En las instalaciones de esta central se cuenta con una unidad turbogás ciclo abierto, en operación con una capacidad nominal de 150 MW. El combustible que se consume es gas natural importado de Estados Unidos.

1.1.1.4. Combustión interna

Los motores de combustión interna son el principal equipo de este tipo de centrales, donde se aprovecha la expansión de los gases de combustión para obtener energía mecánica que gracias al generador eléctrico, es transformada en energía eléctrica (Figura I.4).

Figura I.4 Central de combustión interna



Fuente: CFE, 2005

En el proceso de las máquinas de combustión interna, se asume que ocurre a volumen constante, presión constante o alguna combinación de estas. El proceso a volumen constante es característico del ciclo térmico Otto, mientras que la presión constante la encontramos en el ciclo diesel; con ambos procesos algunas veces es llamado ciclo mixto, combinado o ciclo de presión limitada (*Avallone, 1999*).

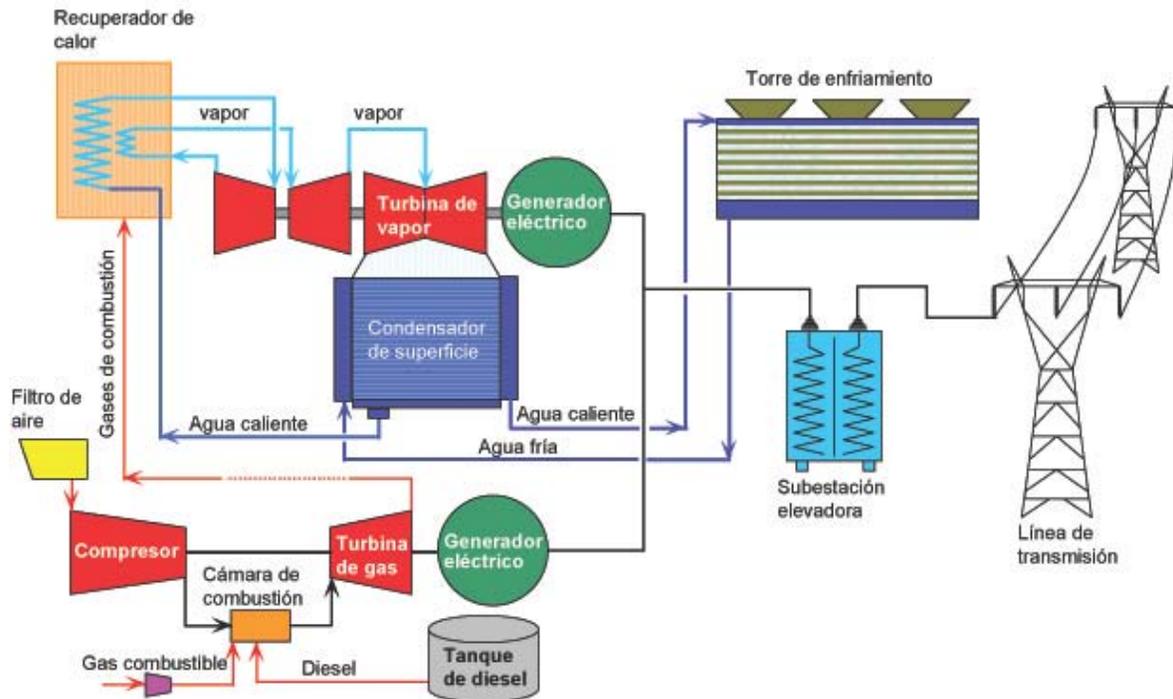
Las centrales de combustión interna, utilizan generalmente diesel como combustible y la tecnología empleada son las máquinas diesel. Actualmente este tipo de motor puede utilizar únicamente combustóleo o diesel.

Como referencia, en CFE operan dos unidades de este tipo, ubicadas en la central Agustín Olachea localizada en el estado de Baja California Sur que utilizan una mezcla en porción de 94 partes de combustóleo por 6 de diesel.

1.1.1.5. Ciclo combinado

El ciclo combinado es la integración de dos ciclos termodinámicos, el ciclo Brayton y el ciclo Rankine, con dos máquinas motrices, la turbina de gas y la turbina de vapor. El proceso de generación de energía eléctrica comienza con la aspiración de aire desde el exterior siendo conducido al compresor de la turbina de gas a través de un filtro. El aire es comprimido y combinado con el combustible, en una cámara donde se realiza la combustión. El resultado es un flujo de gases calientes que al expandirse hacen girar la turbina de gas, que a su vez hace girar el generador eléctrico. Una vez terminado el ciclo térmico de las unidades turbogás (ciclo Brayton), los gases producidos por la combustión poseen un importante contenido energético, el cual se manifiesta en su alta temperatura (hasta 640 °C máximo). Esta energía es utilizada en un recuperador de calor para aumentar la temperatura del agua y elevarla a la fase de vapor, donde se aprovechada para generar energía eléctrica, siguiendo el principio básico de una termoeléctrica convencional. La Figura I.5 nos muestra el proceso descrito anteriormente, donde el equipo principal son las turbinas, tanto la de gas como la de vapor que ya han sido descritas en apartados anteriores.

Figura I.5 Central de ciclo combinado



Fuente: CFE, 2005

El ciclo combinado tiene una ventaja determinante sobre las demás tecnologías gracias a su eficiencia del orden de 50%, comparada con las otras opciones que están alrededor de 37%. Su evolución acelerada, se debe al desarrollo logrado en las turbinas de gas, ya que en 25 años los valores de las eficiencias han aumentado en un 30%.

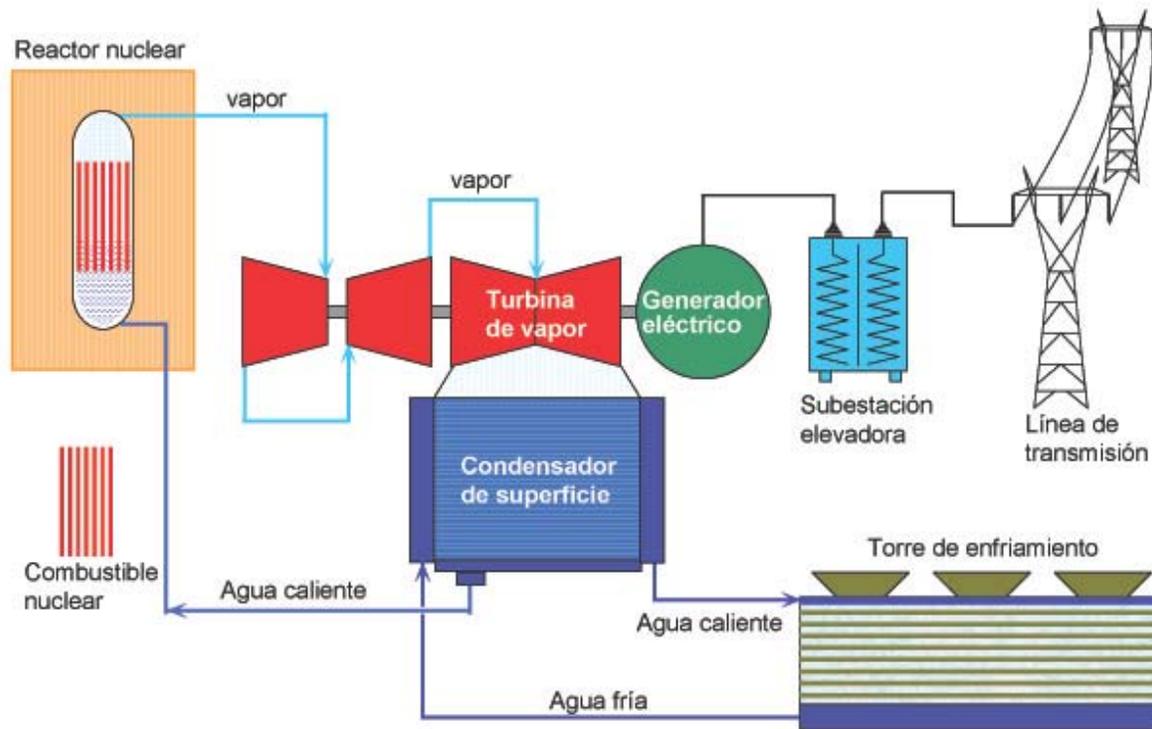
Una ventaja importante de este tipo de plantas, es la posibilidad de construirlas en dos etapas. La primera corresponde a las unidades turbogás, la cual puede ser determinada en un plazo breve e iniciar su operación; posteriormente, se continuaría con la construcción de vapor, completándose así la central de ciclo combinado.

México cuenta con 13 plantas de CFE que utilizan esta tecnología, pero además se cuentan con 21 plantas de ciclo combinado las cuales pertenecen al grupo de Productores Independientes de Energía (PIE). Hay que señalar que la generación de energía eléctrica bajo esta modalidad (PIE), es en su totalidad generada con tecnología de ciclo combinado, aportando así un 23% de la capacidad efectiva instalada de generación.

1.1.1.6. Nucleoeléctricas

Las centrales nucleoeléctricas tienen la base de una termoeléctrica convencional, sólo que el vapor necesario para accionar la turbina y el generador es producido por un reactor nuclear (Figura I.6).

Figura I.6 Central nucleoeléctrica



Fuente: CFE, 2005

Una central de este tipo utiliza Uranio235 o Plutonio239 para generar energía calorífica, la cual es producida por la energía liberada durante la fisión del átomo. La fisión comienza cuando un neutrón a gran velocidad choca contra un núcleo y al no poder albergar al neutrón extra se parte formando dos núcleos más pequeños, dando como resultado una reacción en cadena (*Jinchuk, 2003*).

El principal equipo de una central nucleoeléctrica es el reactor, siendo este un enorme recipiente dentro del cual se está efectuando una reacción de fisión en cadena de manera controlada; está colocado en el centro de un gran edificio de gruesas paredes de concreto, llamado edificio de contención, que protege al personal que lo opera y al público de la radioactividad que se produce.

En la actualidad los principales reactores nucleares son: PWR (*Pressurized Water Reactor*: Reactor de Agua a Presión); BWR (*Boiling Water Reactor*: Reactor de Agua Hirviendo); PHWR (*Pressurized Heavy Water Reactor*: Reactor de Agua Pesada a Presión); HTGR (*High Temperature Gas-cooled Reactor*: Reactor de Alta Temperatura Enfriado por Gas) (Orille, 1996).

Cabe resaltar, que el diseño de las centrales nucleares debe de tener una seguridad excesiva, para así disminuir la probabilidad de que la radioactividad de los productos de fisión se libere al medio ambiente.

La única central nucleoelectrica de nuestro país, se encuentra sobre la costa del Golfo de México, en el municipio de Alto Lucero, estado de Veracruz. La Central Laguna Verde cuenta con dos unidades generadoras de 682.5 MW cada una. Los reactores son tipo Agua Hirviendo (BWR-5). Está certificada por el organismo regulador nuclear mexicano, la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas (CNSNS). La central nucleoelectrica cumple con las más estrictas normas internacionales de seguridad y su operación es certificada y supervisada directamente por los organismos reguladores nacionales e internacionales, para la aplicación de la energía nuclear.

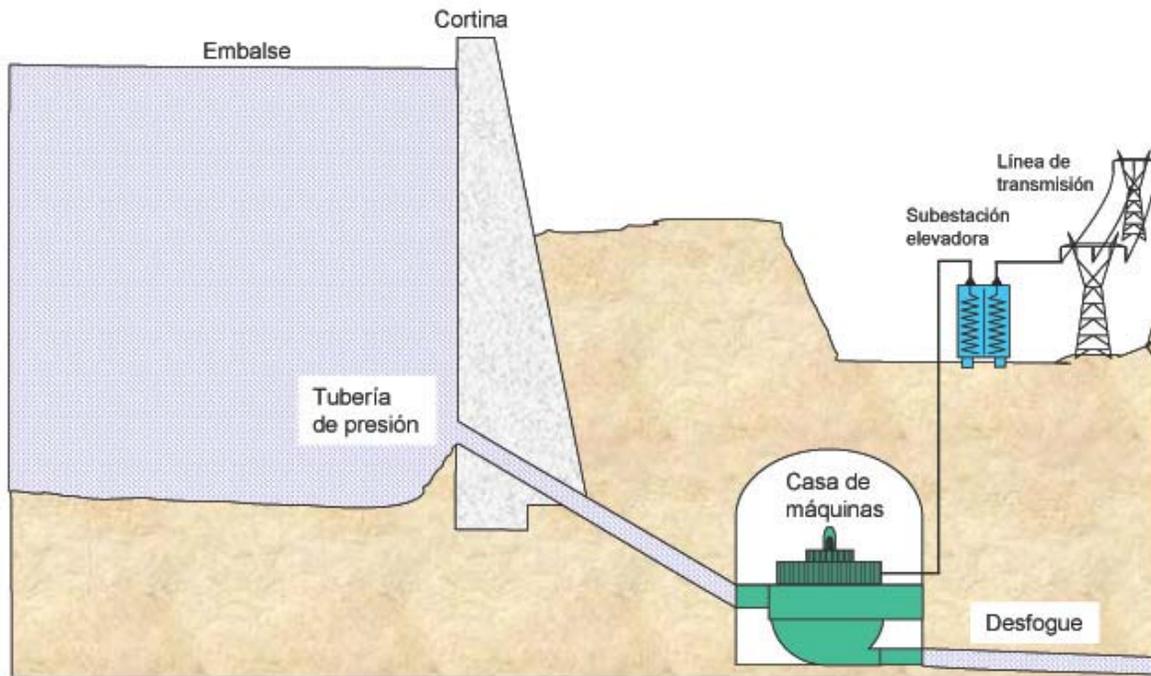
1.2. Con fuentes de energía renovable

1.2.1. Hidroeléctricas

Una central hidroeléctrica, es aquella que aprovecha la energía potencial de cualquier masa de agua a cierta altura, para convertirla primero en energía mecánica y posteriormente en eléctrica. Un sistema de captación de agua provoca un desnivel que origina cierta energía potencial acumulada. El paso del agua por la turbina desarrolla en la misma un movimiento giratorio que acciona el generador eléctrico (Figura I.7).

México cuenta con un gran número de este tipo de centrales, siendo la segunda tecnología empleada en el país para generación de energía eléctrica. Actualmente se encuentran operando 57 centrales hidroeléctricas, que van desde centrales que tienen una capacidad efectiva instalada de 1 MW, como Tirio y Bartolinas, hasta de 2,400 MW como es el caso de la central Manuel Moreno Torres (Chicoasén), o bien Malpaso con 1,800 MW e Infiernillo con 1,000 MW.

Figura I.7 Central hidroeléctrica



Fuente: CFE, 2005

1.2.1.1. Hidroeléctrica de agua corriente

Son plantas que utilizan en cada momento la cantidad de agua disponible del río, la cual puede o no cubrir las necesidades de la demanda, según las características de la carga. No poseen, en consecuencia, ninguna clase de dispositivos de almacenamiento de agua, siendo la presa de derivación dispuesta únicamente para mantener un nivel fijo. En general son plantas de pequeña potencia usadas para servicios limitados en relación con la energía disponible, por caudal y por salto, en la fuente hidráulica; o plantas secundarias con respecto a plantas básicas de mayor potencia, a las cuales presentan el servicio complementario de cubrir los picos de carga exigidos sobre la carga básica.

1.2.1.2. Hidroeléctrica con vaso de almacenamiento

En este tipo de centrales se almacena un volumen considerable de líquido mediante la construcción de una o más presas que forman lagos artificiales. El vaso de almacenamiento permite graduar la

cantidad de agua que pasa por las turbinas. Del volumen almacenado depende la cantidad que puede hacerse pasar por las turbinas. Con almacenamiento de reserva puede producirse energía eléctrica durante todo el año aunque el río se seque por completo durante algunos meses.

1.2.1.3. Hidroeléctrica de bombeo

Las centrales de acumulación por bombeo se utilizan para satisfacer la demanda variable. Consiste en un sistema que almacena energía hidráulica potencial durante las horas o períodos de depresión de carga. Este tipo de centrales se encuentran entre dos vasos, uno inferior y otro superior, así durante las horas de demanda máxima el agua fluye del vaso superior al inferior moviendo las turbinas acopladas a los generador eléctricos. Por el contrario, en las horas de demanda mínima el agua es bombeada del vaso inferior al superior, para así generar de nuevo energía eléctrica. Para el bombeo se utiliza la energía barata de la planta, de esta manera se convierte un gran volumen de energía de bajo precio en uno equivalente de alto valor.

1.2.1.4. Maremotrices

El movimiento de las aguas del mar, producen una energía que se transforma en electricidad en las centrales maremotrices. Se aprovecha la energía liberada por el agua de mar en sus movimientos de ascenso y descenso de las mareas. Para la explotación de la energía de las mareas se requiere de un amplitud de marea mínima de 5 metros, de una bahía, ría o estuario lo suficientemente amplio para que la cantidad de agua a trasvasar durante las mareas sea grande y de la facilidad de construir un dique que separe el estuario del mar, para contener y cerrar el paso del agua. El estuario se llena durante la pleamar y se vacía durante la bajamar a través de unas turbinas y compuertas auxiliares. Esto es, la generación durante el reflujó de la marea (bajamar), se lleva a cabo con el llenado del embalse, efectuándose con las compuertas abiertas y el vaciado con turbinación. En la generación durante el flujo (pleamar), el llenado del embalse se efectúa con turbinación y el vaciado con las compuertas abiertas.

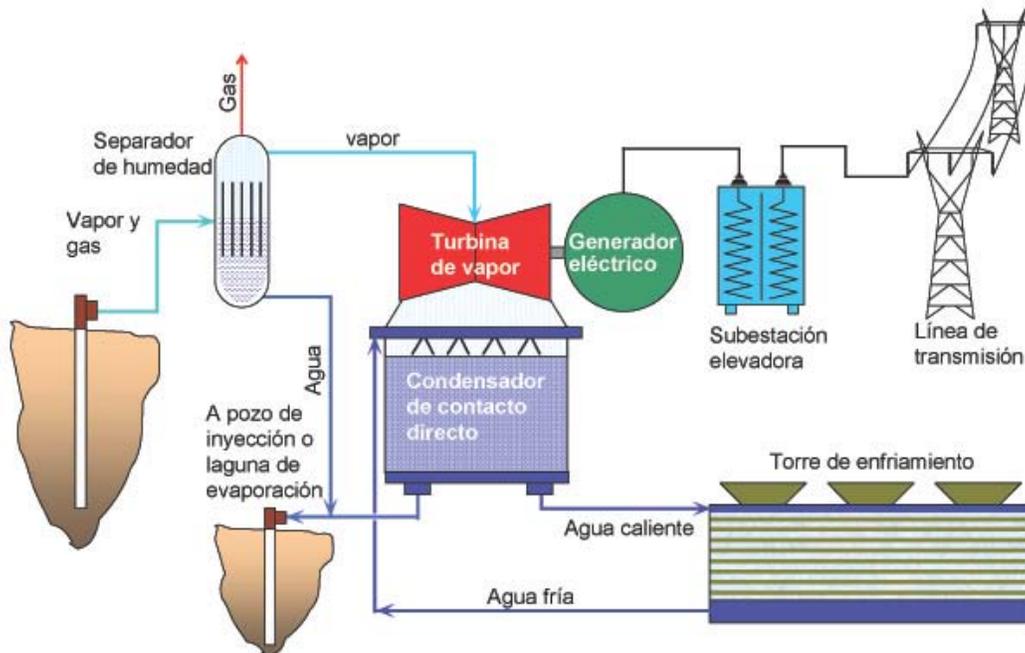
La energía que desarrollan las ondas es enorme y proporcional a las masas de aguas que oscila y a la amplitud de la oscilación. Esta energía se descompone en dos partes, las cuales, prácticamente, son iguales: una energía potencial, la cual provoca la deformación de la superficie del mar, y una energía cinética, debida al desplazamiento de las partículas; en suma de la masa de agua.

1.2.2. Geotermoeléctricas

La energía geotérmica, es la energía calorífica propia de la Tierra. Esta energía se manifiesta con fenómenos térmicos interiores, como son las erupciones volcánicas, geisers, lagunas calientes, volcanes de lodo o manantiales de aguas termales. Al calor contenido en el agua que se ha concentrado en ciertos sitios del subsuelo, se le conoce como yacimientos geotérmicos.

Las plantas geotermoeléctricas utilizan el vapor natural que se extrae de los yacimientos, para alimentar a las turbinas de vapor que mueven a los generadores eléctricos (Figura I.6). La tecnología se basa en principios análogos a los de una termoeléctrica convencional, pero con algunas diferencias importantes de mencionar.

Figura I.8 Central geotermoeléctrica



Fuente: CFE, 2005

La falta de caldera es una diferencia notable, ya que el vapor es obtenido directamente del subsuelo, lo que hace que las turbinas, condensadores y materiales usados para la fabricación del equipo sean diseñados para una aplicación geotérmica específica. Por ejemplo, el vapor entregado a la planta es aproximadamente calculado a 689 kPa (Standar Handbook for Mechanical Engineers, Krendel), siendo ésta una baja presión limita a usar sólo esta sección de la turbina. Adicionalmente, las

turbinas tienen que ser diseñadas con material especial además de mejores diseños para dar fiabilidad al servicio, ya que este tipo de turbinas están lejos de trabajar con un vapor puro, debido a los químicos y los componentes sólidos, líquidos y gaseosos que son transportados a la planta. Esta mezcla de vapor tiene que circular a través de un separador antes de ser entregada a la turbina de vapor.

Actualmente en México existen unidades de 5 MW en las cuales el vapor, una vez que ha trabajado en la turbina, es liberado directamente a la atmósfera, estas centrales están ubicadas en Michoacán y Puebla. En las unidades que actualmente se encuentran operando en Baja California Norte de 22.5 MW, 37.5 MW, 50 MW y 110 MW, el vapor es enviado a un condensador de contacto directo, en el cual el vapor de escape de la turbina es mezclado con el agua separada de este volumen junto con el proveniente del separador, es reinyectado al subsuelo o bien es enviado a una laguna de evaporación.

1.2.3. Solares

La energía solar tiene su origen en la fusión nuclear que se lleva a cabo en el sol, manifestándose en radiación solar. Una central solar, es aquella que aprovecha dicha radiación para generar energía eléctrica. Existen dos tipos de centrales solares: las fotovoltaicas y las fototérmicas.

1.2.3.1. Centrales fotovoltaicas

Los sistemas de aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica utilizan la célula fotovoltaica y transforman directamente la radiación solar en energía eléctrica de corriente continua (Figura I.9). El efecto fotovoltaico es la producción de una fuerza electromotriz en un material semiconductor¹ como consecuencia de la absorción de radiación luminosa, en el cual se han creado artificialmente dos regiones, la tipo P que contiene “huecos” cargados positivamente y la tipo N, que contiene electrones adicionales. La unión de estos materiales P y N al ser expuesta a la luz genera un campo electrostático constante, lo que produce un movimiento de electrones (corriente continua) que fluyen al cerrar el circuito con una carga externa.

Normalmente, las celdas fotovoltaicas que se producen en el mundo se fabrican a base de silicio principalmente. El rendimiento de estas celdas es del orden de entre 15 y 25%, es decir, que sólo

¹ Elementos de conductividad eléctrica intermedia entre un aislante y un conductor.

una pequeña parte de la energía luminosa se aprovecha realmente en forma de energía eléctrica, este rendimiento es menor cuanto más alta es la temperatura.

En México la generación a base de esta tecnología es casi nula, el problema fundamental que presentan las celdas fotovoltaicas es su alto costo, aunque las investigaciones recientes están logrando abaratar a un ritmo apreciable su costo de producción. Pese a que las perspectivas de utilización de esta tecnología para generar electricidad son esperanzadoras a largo plazo, su desarrollo está aún comenzando y no puede esperarse una autentica extensión de su utilización.

Por el momento, su uso más eficaz consiste en su aplicación para instalaciones de baja potencia en lugares cuya lejanía respecto de las redes de transmisión y distribución de electricidad puede hacer rentable este tipo de sistema a pesar del elevado costo.

Figura I.9 Central solar fotovoltaica



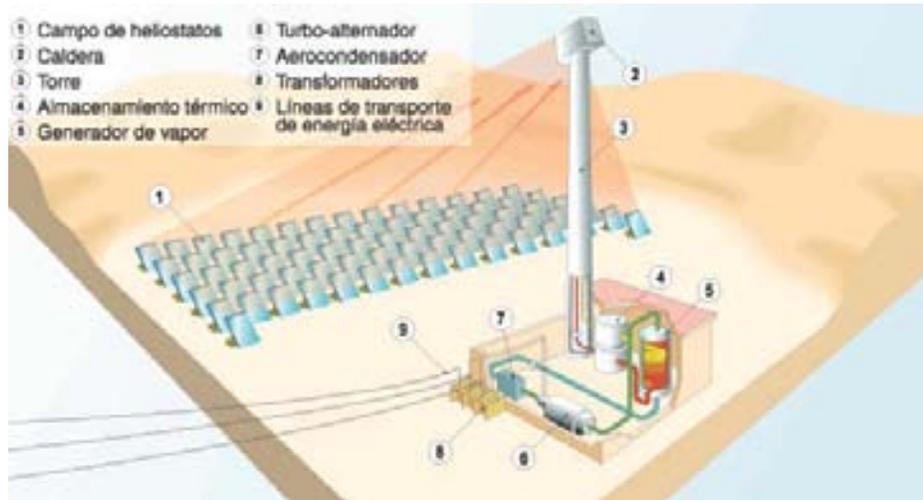
Fuente: UNESA, 2008

1.2.3.2. Centrales fototérmicas

Los sistemas de energía solar térmica transforman la radiación solar en energía calorífica a diversas temperaturas (Figura I.10). Las temperaturas que se manejan son las bajas, medias y altas, en donde en cada rango se tienen diferentes aplicaciones. Los sistemas de bajas temperaturas tienen

aplicación en edificios, calentamiento de agua, uso domestico, calefacción, entre otros. Los sistemas de media y alta temperatura se utilizan en la producción de vapor y electricidad.

Figura I.10 Central solar fototérmica



Fuente: UNESA, 2008

Los sistemas de bajas temperatura tienen dos tipos de circuitos, los que disponen solamente de un circuito de circulación de fluido térmico, son llamados sistemas abiertos. Los circuitos cerrados, consisten en dos circuitos independientes en contacto térmico a través de un intercambiador de calor, que mantienen separados el fluido térmico que circula por los captadores y el agua en consumo. El elemento principal que constituye dichos sistemas es el colector de baja temperatura. Estos dispositivos deben captar la radiación solar, calentando un fluido térmico (menor de 65 °C), pero impidiendo que parte de la radiación del fluido resultante de este calentamiento fluya hacia el exterior.

Los sistemas solares de conversión a media temperatura, se utilizan en granjas solares o sistemas de colectores distribuidos, pudiendo ser empleados en principio para la producción de calor o electricidad, o bien como sistemas compuestos para la producción simultánea de ambas formas de energía. Los colectores de media temperatura son los dispositivos utilizados en estos sistemas, teniendo por objeto concentrar la radiación solar para entregar calor útil a mayor temperatura (100 a 300 °C). En esta categoría se tienen a los concentradores estacionarios y a los canales parabólicos,

todos ellos efectúan la concentración mediante espejos dirigidos hacia un receptor de menor tamaño.

La producción de energía eléctrica a gran escala a partir de la conversión térmica de la energía solar exige temperaturas superiores a los 300 °C, por lo que se llevan a cabo en sistemas de altas temperaturas. Para este fin se pueden utilizar las siguientes tecnologías:

Paraboloides. Reflejan la radiación solar incidente hacia un área reducida situada en el foco, donde se encuentra el absorbedor², una caldera de diseño especial a través de la cual circula el fluido portador de calor.

Hornos solares. Está constituido por cierto número de espejos planos, los cuales reflejan los rayos solares hacia un gran colector parabólico, el cual a su vez concentra los rayos en su foco, donde se encuentra la caldera.

Receptor central. Está formado por un campo de espejos orientables (helióstatos) que concentran la radiación solar sobre una caldera situada en lo alto de una torre ubicada en el centro del campo, o bien en uno de sus extremos.

Receptores o absorbedores. Están situados en lo alto de la torre, tienen como misión facilitar la transformación de la energía radiante en energía interna de un fluido de trabajo.

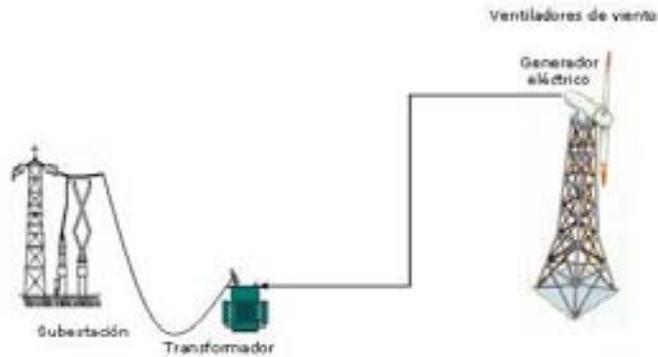
1.2.4. Eoloeléctrica

En una central eoloeléctrica, se aprovecha la energía del viento para convertirla en electricidad, como lo muestra la Figura I.11. Esto se lleva a cabo mediante una aeroturbina que hace girar un generador, es decir, aprovecha un flujo dinámico de duración cambiante y con desplazamiento horizontal, de donde resulta que la cantidad de energía obtenida es proporcional al cubo de la velocidad del viento. También cabe señalar que el viento que pasa a través de un dispositivo

² En los absorbedores se originan temperaturas del orden de los 4 000 °C, siendo necesario que el sistema siempre esté perfectamente orientado hacia el sol.

captador de energía eólica reduce su velocidad como máximo $2/3$ de su valor inicial, lo que equivale a la extracción del 59% de la energía cinética inicial del viento.

Figura I.11 Central eoloeléctrica



Fuente: UNESA, 2008

Los aerogeneradores pueden variar desde 1 hasta 100 metros, y su potencia puede ser desde 1 kW hasta varios MW. La variación de la velocidad del viento con la altura en los primeros metros es una característica de mucha importancia práctica para el aprovechamiento energético del viento, por esta razón, los aerogeneradores deben instalarse ten alto como permitan los costos de las estructuras de sostén y en lo posible por arriba de los 30 metros.

En la actualidad en México hay poca capacidad instalada para aprovechar la energía eólica, sólo se cuenta con 106 unidades por parte de CFE, las cuales tienen una capacidad efectiva instalada de 86 MW; Oaxaca cuenta con 85 MW, mientras que Baja California Sur cuenta con el otro MW generado con la única unidad con la cual disponen. Sin embargo, con la aprobación de nuevos instrumentos regulatorios, se están estableciendo las condiciones para que pueda haber mucha mayor participación en este sector. Tal es el caso de los proyectos que se están desarrollando en la zona del Istmo de Tehuantepec, que contemplan instalar en el período de 2008-2012 una capacidad aproximada de 1900 MW.

Conclusiones

En el presente capítulo se describieron las diversas tecnologías existentes para la generación de energía eléctrica, resaltando las dos clasificaciones principales: las centrales que utilizan energías renovables y las que utilizan como fuente de energía recursos no renovables. Los combustibles fósiles pertenecen a este último grupo, y en general son empleados en centrales termoeléctricas. El primer grupo está integrado por centrales hidroeléctricas, eololéctricas, geotermoeléctricas y solares. Es importante, que para las dos clasificaciones de centrales para generar energía eléctrica, la tecnología más empleada es mediante una turbina impulsada por algún fluido, que acciona un generador eléctrico acoplada a ella, excepto en el caso de las centrales solares, las cuales tienen otros procesos para aprovechar la radiación solar.

En la actualidad, las energías renovables se emplean en las centrales hidroeléctricas, geotermoeléctricas y eololéctricas; la utilización de dichos energéticos se está viendo favorecida en varias partes del mundo como una medida para mitigar la emisión de gases de efecto invernadero. En este sentido, se observa el papel importante que toma el cuidado del ambiente dentro del sector eléctrico para conducirnos a un desarrollo sustentable.

Las centrales que generan con combustibles fósiles a largo plazo se limitarán, dando lugar al impulso e incremento de la utilización de energías renovables, ejemplo de ello son los países como Alemania, Estados Unidos y España. En México, se vislumbra que esta tendencia no sea muy diferente, por lo que es importante estudiar a los países que están en dicha situación y así poder tomar las bases para tener un desarrollo en materia energética. Estas experiencias internacionales serán tratadas en el capítulo siguiente.

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

Capítulo 2

**Experiencias Internacionales en el uso de las
energías renovables para la generación de energía eléctrica**

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

2. Experiencias Internacionales en el uso de las energías renovables para la generación de energía eléctrica

Introducción

Con sede en Río de Janeiro, Brasil, se llevó a cabo, en 1992, la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Desarrollo y Medio Ambiente (*United Nations Conference on Environment and Development*). En ella se plantearon los principales problemas ambientales que podrían afectar los ecosistemas y la calidad de vida de la humanidad. Un tema central fue el cambio climático, cuestión por la cual, la mayor parte de los países se adhirieron al Convenio del Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, para comenzar a considerar las acciones a tomar para reducir el calentamiento global y adoptar medidas para hacer frente a las subidas de la temperatura que son inevitables.

En diciembre de 1997, los gobiernos acordaron incorporar una adición al tratado, conocida con el nombre de Protocolo de Kyoto, que cuenta con medidas más enérgicas y jurídicamente vinculantes. Este Protocolo, tiene por objeto tener un recorte de las emisiones de gases de efecto invernadero de al menos el 5% con respecto a los niveles de 1990 en el periodo de compromiso de 2008 – 2012.

A partir de estos acuerdos, los países comenzaron a emitir políticas públicas para hacer frente a los compromisos adquiridos. Estas políticas estuvieron dirigidas al ahorro de energía, eficiencia energética y a la promoción de la utilización de energías renovables.

En este Capítulo, se abordara la evolución de las políticas públicas, el marco regulatorio y la situación actual en torno a la utilización de recursos renovables eólicos y solares en la generación de energía eléctrica en España, Alemania y Estados Unidos, haciendo especial énfasis en las lecciones que pueden arrojar sus experiencias.

2.1. España

2.1.1. Políticas públicas y marco regulatorio

2.1.1.1. Evolución histórica

Con base en su compromiso internacional, España tomó medidas para cumplir con éste. El primer paso fue la publicación de la Ley 54/1997 el 27 de noviembre de 1997, donde se promueve el uso de energías renovables para satisfacer los compromisos comunitarios establecidos en el Libro Blanco. Posteriormente, se dio a conocer el Plan de Fomento de las Energías Renovables 2000 – 2010, proyecto donde se establecen objetivos por áreas que permitan alcanzar, en el año 2010, como mínimo el 12% de la demanda total de energía primaria generada con fuentes de energía renovables. Este objetivo, que informa las políticas de fomento de las energías renovables en la Unión Europea desde la aprobación del Libro Blanco en 1997, fue la base para el desarrollo de las energías renovables.

Para el año 2004, de acuerdo con los informes anuales, se tuvo que hacer una reestructuración del Plan. En el nuevo Plan de Energías Renovables 2005 – 2010 que se propone, se retoma el mismo objetivo, sin embargo, se plantea una distribución diferente de los esfuerzos por áreas, de manera que sea posible la obtención de dicho objetivo global.

En marzo de 2004, el Gobierno español aprueba el Real Decreto 436/2004, que modifica el marco jurídico y económico de la producción de energía eléctrica en el llamado Régimen Especial³. Este nuevo Decreto ha introducido importantes novedades en el marco regulatorio de la electricidad en Régimen Especial, posibilitando así, un mayor desarrollo de las energías renovables y facilitando la integración en el sistema eléctrico de crecientes volúmenes de electricidad renovable.

Otro punto importante a que hace mención el Decreto, es la posibilidad concedida a los productores de electricidad del Régimen Especial de optar entre la venta de su producción o excedentes al distribuidor, bajo la modalidad de tarifa regulada, o al mercado. Las tarifas, para los productores

³ El Régimen Especial viene siendo regulado en España desde 1980, año en el que se promulgó la Ley 80/1980, de Conservación de la Energía. Esta Ley fue motivada por la necesidad de hacer frente a la segunda crisis del petróleo, y en ella se establecían los objetivos de mejorar la eficiencia energética de la industria y reducir la dependencia del exterior. Actualmente está basado en las tecnologías de generación que utilizan las energías renovables, los residuos y la cogeneración.

acogidos a la primera de las opciones, y los incentivos y primas, para los acogidos a la segunda, quedan fijados como porcentajes de la tarifa eléctrica media o de referencia cada año.

Otro de los pilares sobre los que se apoya el desarrollo de las energías renovables está constituido por las líneas de financiación y ayudas públicas. Durante el año 2004, volvió a estar operativa la Línea de Financiación ICO⁴ – IDAE⁵, a la que se había incorporado, ya en ese año, los antiguos Programas de Ayudas a la Energía Solar Térmica y Fotovoltaica. La aprobación de un tipo impositivo cero (modulable) hasta finales de 2012 para los biocarburantes en el impuesto especial de hidrocarburos, representa un apoyo fundamental para el desarrollo de este tipo de carburantes.

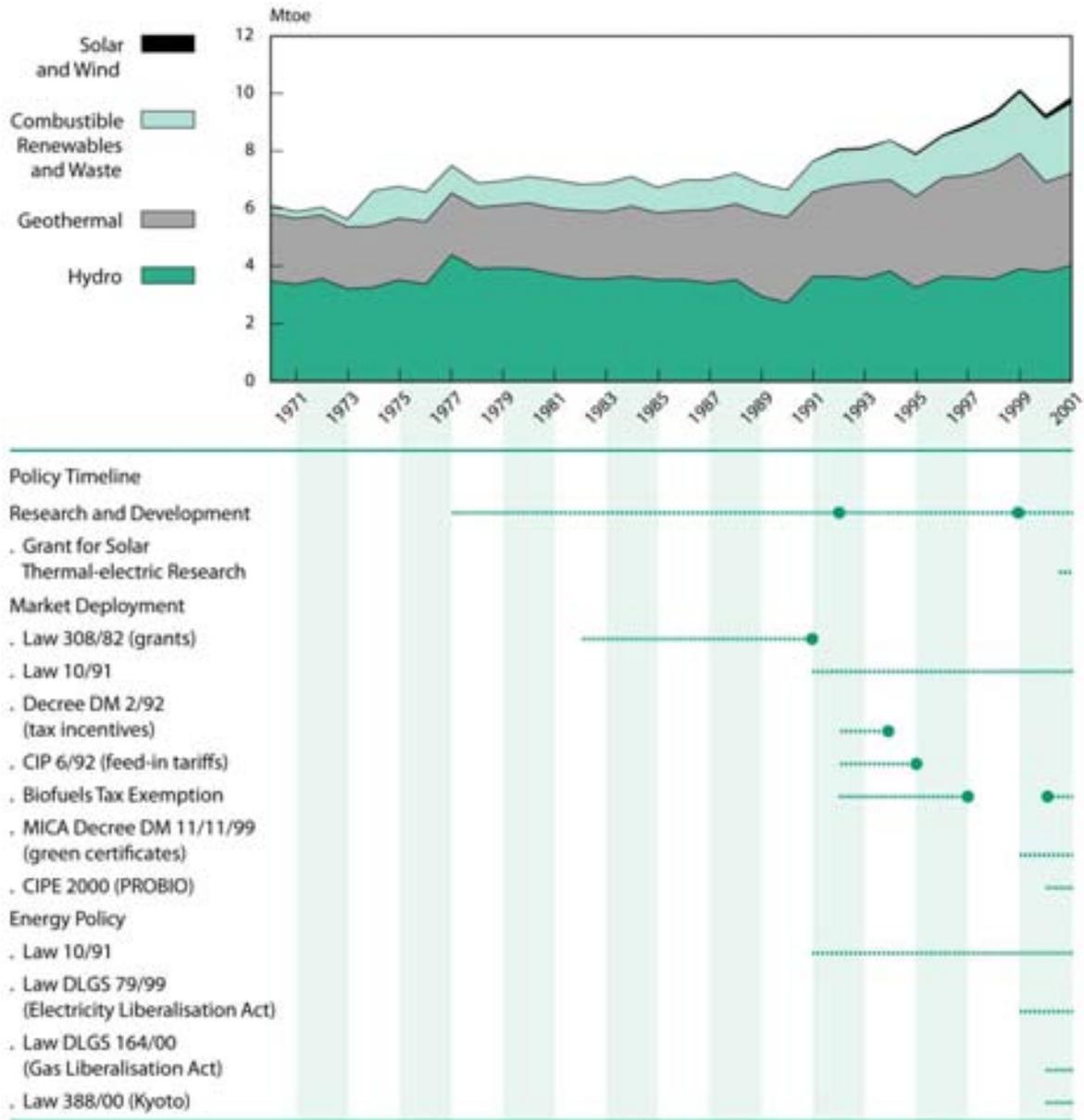
En el año 2005, se llevaron a cabo dos resoluciones que dieron mayor apoyo al sector eléctrico del país, tanto en transmisión como en generación. La resolución de 11 de febrero, regula las condiciones de acceso y conexión de nuevas instalaciones a la red de transmisión. Por otro lado, la resolución de 1 de abril, plantea el desarrollo de un nuevo procedimiento para establecer nuevas instalaciones de generación de energía eléctrica.

En la Figura II.1, podemos observar la evolución de la generación con energía renovable, además de una línea del tiempo que nos muestra las diferentes políticas en el sector eléctrico.

⁴ El Instituto de Crédito Oficial (ICO), es una Entidad Pública Empresarial adscrita al Ministerio de Economía y Hacienda.

⁵ El Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE), es una Entidad Pública Empresarial, adscrita al Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, a través de la Secretaría General de Energía, de quien depende orgánicamente.

Figura II.1 Evolución de la generación total de energía renovable y las políticas a través del tiempo



Fuente: IEA, 2004

2.1.2. Situación actual

a. Libro Blanco de la Unión Europea

El Libro Blanco, tiene como fin plantear planes estratégicos y de acción que estén dirigidos hacia el objetivo de lograr una penetración del 12% de las fuentes de energía renovables en la Unión

Europea antes del año 2010. Este objetivo orientativo se considera como un importante objetivo mínimo que mantener, independientemente de cuáles sean los compromisos vinculantes finales sobre la reducción de emisiones de CO₂. Además, el documento plantea ofrecer a las fuentes de energía renovables buenas posibilidades de mercado sin demasiadas cargas financieras (*Comisión Europea, 1997*).

b. Directiva 2001/77/CE del Parlamento Europeo y del Consejo

La Directiva, tiene por objetivo fomentar un aumento de la contribución de las fuentes de energía renovables a la generación de electricidad en el mercado interior de la electricidad y sentar las bases de un futuro marco comunitario para el mismo (*DOCE, 2001*).

Además, se propone la creación de un marco legislativo que regule las energías renovables, el uso de los certificados verdes, las ayudas a la inversión, exenciones fiscales y devoluciones de impuestos, y se garantizará el funcionamiento de estas acciones. Los sistemas de apoyo mencionados, fomentarán el uso de energías renovables para la generación de energía eléctrica de manera eficaz y con costos bajos, ya que el aumento del uso de fuentes renovables en el mercado eléctrico permitirá la reducción de costos.

c. Ley del Sector Eléctrico

Esta Ley fue publicada el 28 de noviembre de 1997, teniendo por objeto regular las actividades destinadas al suministro de energía eléctrica, consistente en su generación, transporte, distribución, comercialización e intercambios intracomunitarios e internacionales, así como la gestión económica y técnica del sistema eléctrico (*CNE, 2008*)

La regulación de dichas actividades tiene por finalidad:

- La adecuación del suministro de energía eléctrica a las necesidades de los consumidores.
- La racionalización, eficiencia y optimización de aquéllas, atendiendo a los principios de monopolio natural del transporte y la distribución, red única y de realización al menor costo.

Además, establece que las actividades destinadas al suministro de energía eléctrica se ejercerán de forma coordinada bajo los principios de objetividad, transparencia y libre competencia.

También es reconocida la libre iniciativa empresarial para el ejercicio de las actividades destinadas al suministro de energía eléctrica reguladas por dicha Ley. Tales actividades se ejercerán garantizando el acceso y conexión a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica a todos los consumidores demandantes del servicio dentro del territorio nacional y tendrán la consideración de servicio esencial.

d. Plan de Energías Renovables 2005-2010

El Plan de Energías Renovables (PER) 2005 – 2010, constituye la revisión del Plan de Fomento de las Energías Renovables en España 2000 – 2010. En este Plan se trata de mantener el compromiso de cubrir con fuentes renovables al menos el 12% del consumo total de energía en 2010, así como incorporar otros dos objetivos indicativos: 29.4% de generación eléctrica con renovables y 5.75% de biocarburantes en transporte para 2005, los cuales fueron adoptados con posterioridad al anterior Plan. Además, se incluye un análisis exhaustivo, área por área, de las posibilidades de desarrollo a lo largo del periodo de ejecución del Plan (*MIE, 2005*).

e. Resolución de 11 de febrero de 2005

El objetivo de esta Resolución, es establecer las condiciones y el desarrollo del proceso de acceso y del proceso de la conexión de nuevas instalaciones a la red de transporte o ampliación de la potencia y condiciones declaradas en instalaciones existentes ya conectadas a dicha red (*BOE, 2005*).

La Resolución, también insta las siguientes condiciones:

- Las condiciones de acceso de nuevas instalaciones a la red de transporte o ampliación de las existentes, el proceso de solicitud asociado, el suministro de información y los criterios empleados por el Operador del Sistema y Gestor de la Red de Transporte, para la concesión o denegación de las solicitudes de acceso, así como los criterios para establecer, en caso de denegación, alternativas para el acceso.
- Las condiciones de conexión de nuevas instalaciones a la red de transporte o ampliación de las existentes, el proceso de solicitud asociado, el suministro de información y los criterios empleados en el proceso por el Operador del Sistema y Gestor de la Red de Transporte.

2.1.3. Estrategias seguidas

El éxito del gobierno español en el desarrollo de las energías renovables se debe a los siguientes factores fundamentales (*Borja, 2005*):

- La existencia de leyes y reglamentos específicos para fomento de las fuentes de energías renovables.
- Soporte gubernamental para investigación y desarrollo tecnológico, así como para asimilación y transferencia de tecnología.
- Desarrollo de una industria propia.
- Disponibilidad de recursos renovables de energía.
- Apoyo público.

Para que el gobierno español pudiera llegar a concretar los factores mencionados, se llevo más de dos décadas. El fomento del uso de energías renovables, fue motivado por la necesidad de hacer frente a la segunda crisis del petróleo de 1979.

2.1.3.1. Plan Energías Renovables (PER) 1986

La aprobación del Plan Energético Nacional (PEN) en 1979, fue el inicio de una nueva e importante etapa política energética española, la política del ahorro de energéticos y uso racional de la energía. Para 1980 se promulgó la Ley 80/1980, de Conservación de la Energía, donde se estableció la existencia de un Régimen Especial de producción de energía eléctrica, como régimen diferenciado del ordinario, lo cual dio lugar al fomento de la autogeneración eléctrica y de la producción hidroeléctrica de pequeñas centrales. Con el fin de actualizar periódicamente el PEN, en 1986 se aprobó el Plan de Energías Renovables (PER), en donde se recomienda la penetración paulatina de estas fuentes de energía en el contexto energético global.

2.1.3.2. Plan Energético Nacional (PEN) 1991 – 2000

Posteriormente, el Plan Energético Nacional 1991 – 2000 estableció un programa de incentivación de la cogeneración y de la producción con energías renovables para intentar pasar del 4.5 % de la

producción nacional de energía eléctrica en 1990 al 10% para el año 2000. Dentro de este contexto, la Ley 40/1994 (LOSEN⁶) consolidó el concepto de Régimen Especial como tal.

En diciembre de 1994, se publicó el Real Decreto 2366/1994 sobre producción de energía eléctrica por instalaciones hidráulicas, de cogeneración y otras instalaciones abastecidas por recursos o fuentes de energía renovables, que aunque no es desarrollado en la LOSEN, sí define los principios que se establecerían en ella.

Finalmente en noviembre de 1997, la Ley 54/1997, del Sector Eléctrico, hace compatible la liberalización del sistema eléctrico con el objetivo de garantizar el suministro, con una calidad adecuada, al menor precio posible, y minimizando el impacto ambiental. Por ello promueve la producción en Régimen Especial, basado en las tecnologías de generación que utilizan las energías renovables, los residuos y la cogeneración. Estas instalaciones pueden ceder la energía excedente a la red, realizar ofertas en el mercado de producción o establecer contratos bilaterales físicos. Un año después, el sistema económico para el Régimen Especial fue desarrollado por el Real Decreto 2818/1998, el 23 de diciembre, sobre producción de energía eléctrica por instalaciones abastecidas por recursos o fuentes de energía renovables, residuos y cogeneración. Es este Decreto se estableció el impulso del desarrollo de instalaciones de régimen especial, mediante la creación de un marco favorable sin incurrir en situaciones discriminatorias que pudieran limitar la libre competencia, aunque estableciendo situaciones diferenciadas para aquellos sistemas energéticos que contribuyen con mayor eficacia a la mejora de la eficiencia energética, reducción del consumo y la protección del medio ambiente.

Para llevar a cabo los objetivos del Decreto, se estableció un sistema de incentivos temporales para aquellas instalaciones que requirieran de ello, para situarse en posición de competencia en un mercado libre. Además resaltó, que para aquellas instalaciones basadas en energías renovables y de residuos, el incentivo no tiene límite temporal debido a que es necesario internalizar sus beneficios ambientales y a que, por sus características especiales y nivel tecnológico, sus mayores costos no permitan la competencia en un mercado libre.

⁶ Ley de Ordenación del Sistema Eléctrico Nacional

2.1.3.3. Plan de Fomento de Energías Renovables 2005 – 2010

En diciembre de 1999, y en sintonía con la Unión Europea, el gobierno aprobó un Plan de Fomento de Energías Renovables (revisado por el Plan de Energías Renovables en España 2005-2010, del 21 de julio de 2005), que recoge las estrategias relevantes necesarias para que el crecimiento de cada una de las áreas de energías renovables pueda cubrir, en su conjunto, cuando menos el 12% del consumo de energía primaria en el año 2010. Este objetivo plantea dos retos (*MIE, 2005*):

- En primer lugar, la necesidad, al menos, de doblar la producción a partir de las energías renovables, al encontrarnos en un contexto de crecimiento de demanda energética.
- Diversificar las contribuciones. El grueso de la contribución actual de estas energías proviene de la generación de electricidad de origen hidráulico y de la biomasa (95% entre las dos), la primera de ellas con unas perspectivas limitadas de desarrollo, y la biomasa, que debe incorporar nuevas formas de utilización y de obtención de recursos, para alcanzar la importante contribución que se le asigna.

2.1.4. Capacidad Instalada

Como se ha estado planteando a lo largo del desarrollo de este apartado, España a partir de 1980 ha tomado medidas para impulsar el uso de energías no convencionales. No obstante, el uso de energías renovables empieza su evolución en la década de los 90, con el Plan Energético Nacional 1991-2000, donde se empieza a incentivar el uso de dichos energéticos, pero es hasta el año 2000 cuando comienza a hacer presencia significativa.

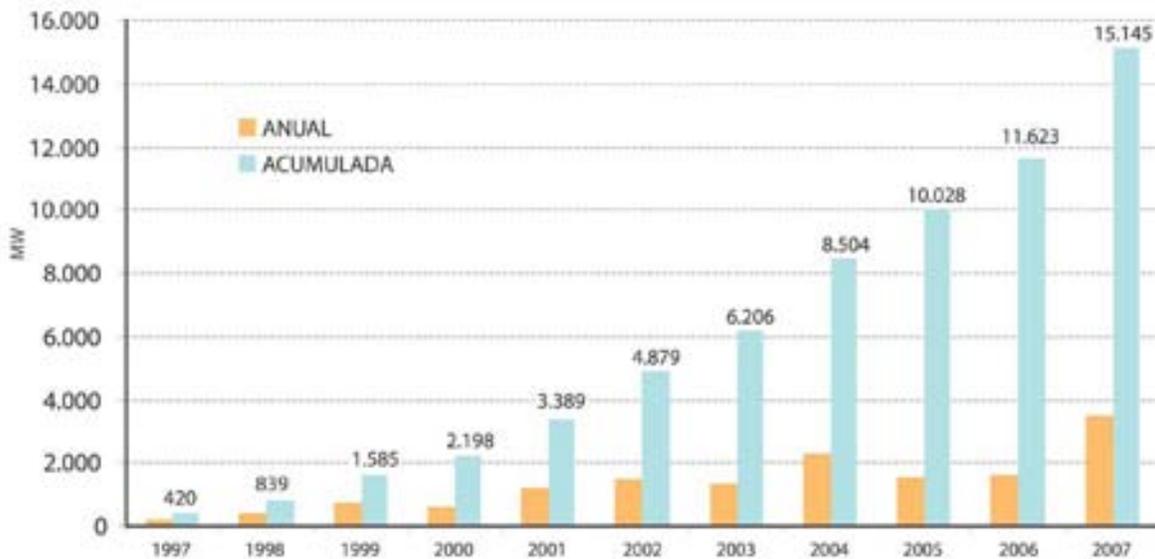
2.1.4.1. Energía eólica

a. Evolución histórica y situación actual

La capacidad eólica instalada ha crecido con rapidez, de 7 MW en 1990 a 3,389 MW en 2001, teniendo un promedio de crecimiento anual de 74.7% (*IEA, 2004*). Para el 2003, la energía eólica continuó mostrando un fuerte y muy significativo crecimiento, con alrededor de 1,350 MW de nueva capacidad instalada y 1,920 MW para el 2004 (*IEA, 2005*).

En el 2007, la capacidad instalada fue de 3,522 MW (Figura II.2), lo que supone un aumento del 221% respecto a la registrada en 2006 y sitúa en 15,145 MW la capacidad total, un 30% superior respecto a la potencia acumulada al final del año anterior. El incremento de este año supone además un fuerte impulso para lograr el cumplimiento del PER 2005-2010, aprobado por el Gobierno en 2005, que fija como objetivo para la eólica alcanzar los 20,155 MW instalados al final de dicho periodo. Con la capacidad instalada en este año, se superan las previsiones del PER y bastará que en los tres años restantes hasta el final de la vigencia de dicho plan el crecimiento sea de algo más de 1,700 MW anuales para hacer realidad dicho objetivo, ritmo de crecimiento que el sector considera alcanzable (AEE, 2008).

Figura II.2 Evolución anual de la capacidad eólica instalada



Fuente: AEE, 2004

2.1.4.2. Energía solar

a. Evolución histórica y situación actual

La energía solar ha destacado por su crecimiento principalmente en el sector fotovoltaico, donde su capacidad aumentó de 5 MW en 1993 a 16 MW en 2001, con una generación eléctrica de 24 GWh para este último año. El crecimiento en el mercado fotovoltaico, fue fortalecido en esa década, gracias a la reducción de costos, al aumento de las diversas aplicaciones, y al significativo esfuerzo

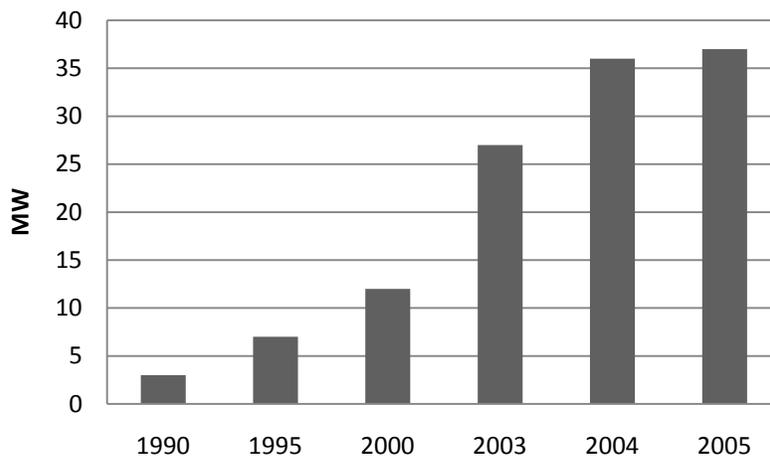
de los programas de investigación y desarrollo, especialmente para la interconexión de las instalaciones con la red (IEA, 2004).

Posteriormente, tanto la generación de energía fototérmica como la fotovoltaica vieron un incremento en 2003, pero dicho incremento se mantuvo muy debajo del necesario para alcanzar los objetivos establecidos en el PER, especialmente para la primera. En este año, sólo fueron instalados 80 000 m² de calentadores solares, logrando sólo cubrir el 18.5% respecto al pronóstico que se estimaba en el Plan para el periodo de 1999 – 2006 (IEA, 2007).

En 2004, 90 000 m² fueron instalados, lo cual significa que para finales de este año sólo se obtuvo el 8% del objetivo fijado; sin embargo, el número de proyectos para los calentadores solares llevados a cabo, puede que sea mayor que lo establecido, ya que la evaluación sólo contemplaba las instalaciones que han recibido fondos públicos. Es más, las nuevas regulaciones gubernamentales obligan en gran cantidad a las instalaciones nuevas y en reconstrucción, a la instalación de sistemas solares, lo cual conducirá a un significativo crecimiento en las facilidades de este tipo para años posteriores, como por ejemplo, el *Código Técnico de la Edificación*, que espera su principal contribución en la instalación de sistemas fototérmicos.

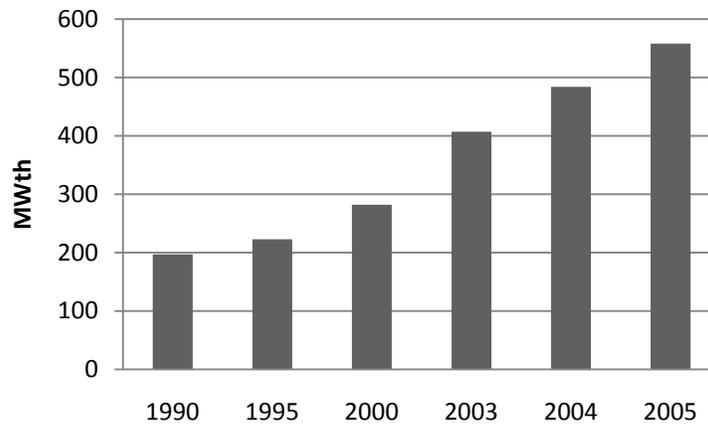
La Figura II.3 y la Figura II.4 nos muestran la evolución que ha tenido la energía solar en tecnologías fotovoltaicas y fototérmicas respectivamente.

Figura II.3 Evolución de la capacidad instalada con tecnología fotovoltaica



Fuente: El autor con datos de IEA, 2007

Figura II.4 Evolución de la capacidad instalada con tecnología fototérmica



Fuente: El autor con datos de IEA, 2007

2.2. Alemania

2.2.1. Políticas públicas y marco regulatorio

2.2.1.1. Evolución histórica

Desde la década de 1970, con la crisis del precio del petróleo, los mercados energéticos internacionales han experimentaron profundas transformaciones. En Alemania, el cambio se dio en el campo de las energías renovables, donde se puso el mayor esfuerzo para apoyar la investigación y desarrollo en esta materia.

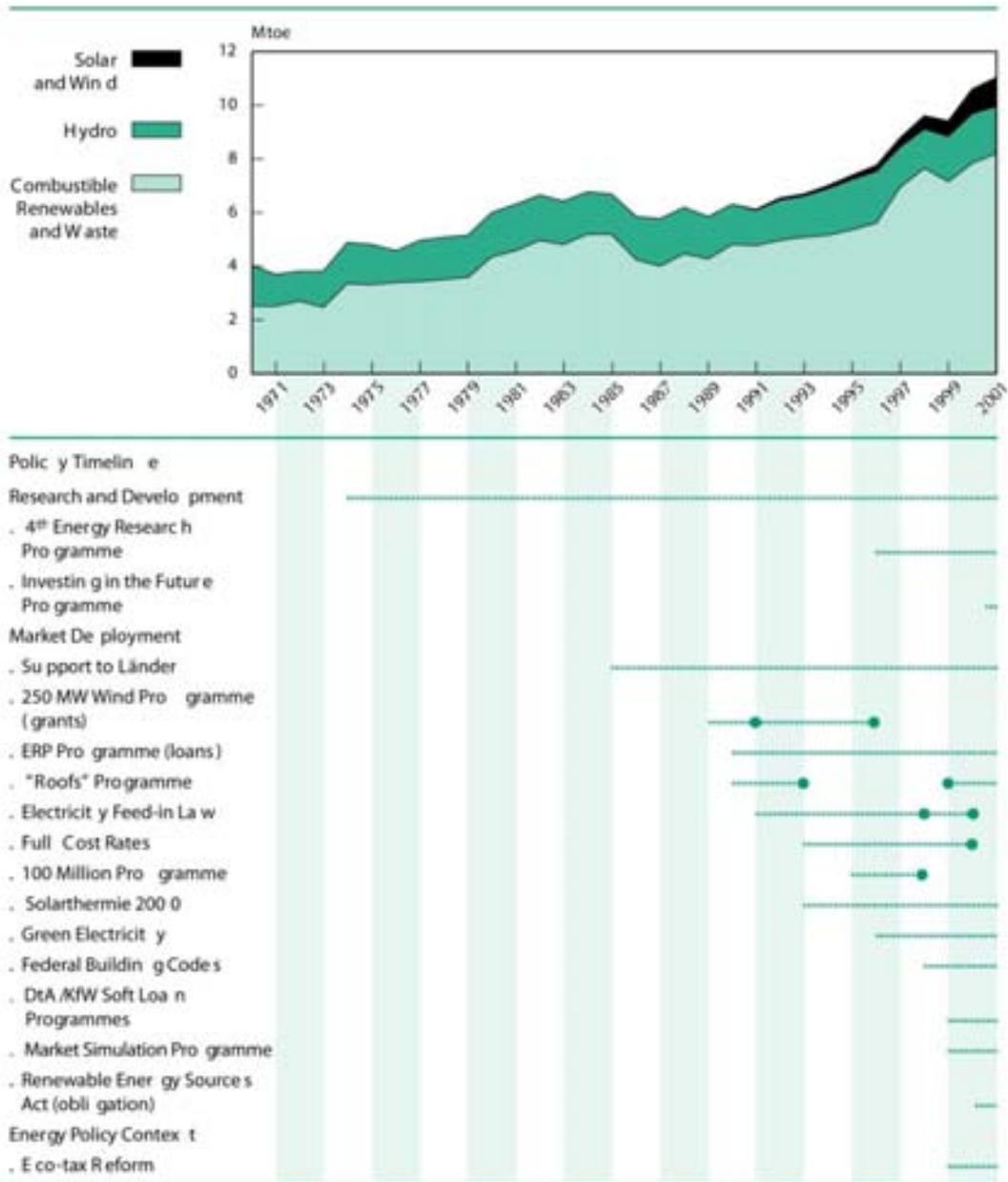
La política central que promueve dicho desarrollo, ha sido mantener las tarifas al mínimo para electricidad proveniente de recursos energéticos renovables. En 1991, se introdujo la Ley para la Alimentación Eléctrica (EFL), la cual fue reestructurada en 1998 y en el 2000 suplida por la Ley de Energías Renovables (EEG), la cual manejaba los mismos principios que la EFL. La EFL tenía como objetivo el incremento del uso de energías renovables en el abastecimiento eléctrico nacional.

La EGG amplía las causas para el apoyo a las energías renovables, y así incluirlas en el desarrollo sustentable del abastecimiento energético. Esta regulación asegura el acceso a la red nacional para la electricidad generada con recursos renovables.

Adicionalmente a la EFL y EEG, otras políticas fueron surgiendo para la promoción el mercado de las energías renovables en el sector eléctrico, la investigación y desarrollo, además de establecer las tecnologías con energía renovables en un marco político.

En la Figura II.5, podemos observar la evolución de la generación con energía renovable, además de una línea del tiempo que nos muestra las diferentes políticas en el sector eléctrico.

Figura II.5 Evolución de la generación total de energía renovable y las políticas a través del tiempo



Fuente: IEA, 2004

2.2.1.2. Situación actual⁷

Los objetivos de la política energética alemana son la garantía de los suministros, la rentabilidad del abastecimiento y la protección del medio ambiente y de los recursos naturales. Desde la unificación del país los principios de la economía de mercado y el ordenamiento jurídico rigen también en los nuevos Estados Federados.

En Alemania el suministro de energía está a cargo de empresas privadas. El Estado fija el marco legal de la economía energética, constituido por la Ley de Economía Energética, las normas de previsión para casos de crisis, las disposiciones sobre reservas y la normativa de protección medioambiental, etc.

a. Ley de Energías Renovables (*Erneuerbare –Energien –Gesetz, EEG*)

El antecedente de esta ley fue la Ley para la Alimentación Eléctrica (*Electricity Feed-In Law, EFL*). La publicación de esta ley se hace en el año de 1991, y esta regulación asegura el acceso a la red para la electricidad generada con fuentes renovables de energía, además, obliga a las compañías eléctricas a comprar ésta electricidad.

En el año 2000, la Ley de Energías Renovables (EEG) reemplazó a la EFL conservando los mismos principios.

La EEG establece un precio mínimo con la obligación de la empresa suministradora de energía más cercana de aceptar y remunerar la electricidad de energías renovables; así como la transferencia de las remuneraciones a los operadores de redes de transmisión (redes de alta tensión), con la obligación general de compensar las diferentes cargas. Además, la obligación de compra porcentual de las empresas suministradoras de energía que abastecen con electricidad a consumidores finales. De esta manera se consigue una distribución a nivel nacional de las diferentes cargas regionales. Este procedimiento implica un aumento medio de los costos de adquisición de electricidad para los consumidores finales.

En cuanto a las remuneraciones mínimas para los operadores de centrales de energías renovables, su monto se diferenciará considerando el tipo de las energías renovables, el tamaño de las instalaciones

⁷ Esta sección se basa principalmente en la información del *IEA, 2004*.

y, en el caso de la energía eólica, también su ubicación. Mediante los montos fijos por cada kWh transferido a la red, y también mediante un periodo de vigencia máxima de 20 años, se consigue seguridad para la planificación y las inversiones. De esta manera se incentivan las inversiones en esas instalaciones. Además de mantener la meta de ampliar la explotación de la energía eólica a un alto nivel, la EEG apunta a conseguir una dinámica similar para la biomasa y para el despegue de las instalaciones fotovoltaicas y geotérmicas para la producción de electricidad.

En junio de 2008, fue modificada la EEG. Con la modificación, se aumentan las primas en las tarifas para la energía eólica; esta tarifa representa el pago compensatorio que se hace a los propietarios de los sistemas de energías renovables cuando la energía de sus sistemas se vende a la red pública. La nueva ley aumenta las primas en las tarifas para la energía eólica hasta situarla entre los €0.092/kWh y los €0.15/kWh⁸.

El parlamento también reformó el EEG para la electricidad procedente de la energía solar. Los sistemas fotovoltaicos recibirán una tarifa de utilización de entre €0.33/kWh y €0.43/kWh, dependiendo de la cantidad de electricidad vendida a la red pública. Según la nueva normativa, la tarifa descenderá entre un 8% y un 10% en 2010, y posteriormente un 9% cada año después del año 2011.

Estas dos reformas son importantes de cara a los inversores. En lo que respecta a la energía eólica, el aumento de las tarifas proporciona un incentivo superior para las compañías eólicas en relación a la entrada en el mayor mercado de energía eólica del mundo (según su capacidad acumulada).

b. Eco –Tax Reform

Con la entrada de los “impuestos – ecológicos”, los impuestos en gasolina, diesel, gas natural y gas LP se vieron incrementados. Al mismo tiempo, un impuesto especial fue introducido en el sector eléctrico. La primera etapa de la reforma, aumentaba los impuestos de los combustibles fósiles. Para finales de 1999, la segunda etapa de dicha reforma fue adoptada con el incremento anual en los próximos cuatro años.

⁸ www.medioambiente.com

En el 2002, los biocombustibles estuvieron exentos de dichos impuestos hasta finales del 2008. Con esto, la competitividad de las tecnologías desarrolladas con energía renovable se incrementó en los mercados de calefacción y transporte.

2.2.2. Estrategias seguidas⁹

Desde 1974, el Gobierno de Alemania ha apoyado al desarrollo tecnológico para aprovechar las energías renovables, sobre todo la eólica. Esto se llevó a cabo a través del Ministerio Federal para la Educación, la Ciencia, la Investigación y la Tecnología, mediante una serie de programas multianuales denominados Programas del Gobierno Federal para la Investigación y la Tecnología de la Energía. A partir de entonces se han realizado cambios estratégicos a estos programas pero sus objetivos fundamentales aún están vigentes.

Los objetivos principales de los Programas del Gobierno Federal para la Investigación y Tecnología de la Energía, son conservar los recursos energéticos no renovables, asegurar el suministro de energía y proteger el medioambiente. Mediante estos programas se establecieron las condiciones que permitirían el desarrollo de las opciones tecnológicas para aprovechar las fuentes de energía renovable. Entre 1998 y 2001 el apoyo gubernamental al desarrollo de tecnologías para aprovechamiento de las fuentes de energía renovable alcanzó €489 millones, es decir un promedio de €122 millones por año. Con estos apoyos, se busco:

- Mejorar el funcionamiento y la confiabilidad de las técnicas existentes.
- Desarrollar y demostrar los conceptos tecnológicos para el futuro.
- Apoyar la investigación básica de los dos puntos anteriores.

Otra estrategia importante, fue la entrada en vigor de la EFL, con la que se obligó a las compañías eléctricas a comprar electricidad proveniente de fuentes renovables de energía al precio garantizado de 90% de la tarifa promedio por kWh.

En el año 2000, con la publicación de la EEG, se plantean algunos puntos para incentivar al uso de energía renovable:

⁹ Los programas estudiados en esta sección se basan principalmente en la bibliografía del *IEA, 2004*.

- Los operadores de la red eléctrica tienen la obligación de dar prioridad de acceso a toda generación de electricidad proveniente de cada una de las fuentes de energías renovables.
- Una tarifa fija para compra de electricidad proveniente de cada una de las fuentes de energía renovable.
- Reglas para la conexión a la red y refuerzo de la red.
- Un mecanismo para compartir equitativamente los costos de tarifa entre todos los operadores de la red.

En el año 2001, bajo la responsabilidad del Ministerio de Economía y Tecnología, entró en vigor un Plan de Inversión para el Futuro. El presupuesto anual de este Plan fue de €41 millones, que permitieron el financiamiento de proyectos de investigación y desarrollo de tecnologías de fuente renovables de energía. Como parte de este Plan se encuentra un programa de mediciones fundamentales para el desarrollo de centrales eoloeléctricas fuera de la costa.

Actualmente, todo indica que Alemania continuará su desarrollo en energéticos renovables, como se puede ver en el Programa Integrado de Energía y Protección del Clima aprobado por el Gobierno Federal a finales de 2007, donde la potencia de las energías renovables y una mayor eficiencia energética constituyen asimismo el núcleo de dicho programa. Los objetivos son seguir avanzando en el desacoplamiento entre el desarrollo económico y las emisiones, incrementar la eficiencia energética y garantizar la seguridad del abastecimiento energético.

2.2.2.1. 250 MW Wind Programme

El programa *250 MW Wind Programme*, tiene el principal interés en el mercado eólico de Alemania. El programa se estableció en 1989, como el *100 MW Wind Programme* y fue extendido en 1991 a 250 MW, llevándose a cabo hasta el 2006. El plan proveía la concesión de la instalación y la operación de turbinas eólicas apropiadas para su localización. La última concesión fue aprobada a fines de 1996 para turbinas que fueron conectadas a la red para mediados de 1998. El programa nombrado *Scientific Measurement and Evaluation Programme (WMEP)* es parte del esquema de apoyo. Todas las turbinas que recibieron la ayuda económica serán monitoreadas por diez años. El programa proporciona €102/kW, teniendo un límite de €1 300 para instalaciones mayores a 1 MW.

2.2.2.2. ERP –Environment and Energy –Saving Programme

Este programa busca proporcionar bajos intereses en los préstamos para proyectos de energías renovables, llevándose a cabo con ayuda del banco público *Deutsche Ausgleichsbank (DtA)* (*Kreditanstalt für Wiederaufbau KfW* para 2003). Este apoyo era posible sólo para las compañías privadas. El plazo del crédito para estos préstamos, se encontraba entre diez y veinte años, contando con dos a cinco años de reembolso por días feriados. La tasa de interés se encuentra 2% debajo del nivel del mercado y se encuentra un 50% del límite de la tasa de interés.

Esta política financiera, beneficiaba principalmente al sector eólico, solar, hidráulico y a la biomasa.

2.2.2.3. 1'000,000 Roofs Programme

El programa *1'000,000 Roofs Programme* fue una ampliación del *1,000 Roofs Programme*, el cual planteaba un proyecto piloto a gran escala para tecnologías fotovoltaicas, daba subsidios para los costos de generación del 60% y 50% para los estados de occidente y oriente respectivamente. Para cuando el programa finalizó, en 1993, alrededor de 2 250 unidades fueron instaladas, mismas que siguen siendo monitoreadas.

Seis años después, el nuevo programa difundía la instalación o ampliación de los sistemas fotovoltaicos mayores de 1 kW. Los préstamos tenían una tasa de interés de 4.5% por debajo de las condiciones que el mercado ofrecía, con un periodo de reembolso a diez años.

2.2.2.4. Solarthermie 2,000 plus

El antecesor a este programa fue el *Solarthermie 2,000*, el cual tenía por objeto probar la viabilidad de los sistemas de calefacción solar a gran escala, en el área residencial y edificios públicos, así como en pequeñas poblaciones. Este también analiza el comportamiento de los colectores solares por un periodo de tiempo. Las instalaciones a gran escala que se llevaron a cabo suman 63, y fueron 7 para sistemas térmicos para pequeñas poblaciones, algunas de ellas con almacenamiento térmico temporal. Todos los proyectos fueron monitoreados. El periodo de este programa fue de 1993 al 2002, donde el objetivo del costo nivelado fue de €13/kWh.

El nuevo programa se publicó en el año de 2004, poniendo como objetivo el incremento de la contribución anual de la calefacción y calentamiento del agua con una instalación individual de entre el 10 y el 30 %, o hasta el 60%, con plantas con almacenadores térmicos.

2.2.2.5. Home Grant (Eigenheimzulage)

Bajo este programa, establecido en 1995, los hogares recibían una concesión federal para la adquisición de casas y apartamentos. Estas concesiones están arriba de €256 por año, durante un máximo de ocho años, si es instalado un colector solar o una bomba térmica.

2.2.2.6. Market Simulation Programme

En 1995 se anuncia el programa *1,000 Million Programme*, con duración de tres años, el cual fue el antecesor del *Market Simulation Programme*.

El *1,000 Million Programme*, se publicó por el Ministerio de Economía, el cual fomentaba el uso de energía renovable vía subsidios capitales. Pone un particular énfasis a los colectores solares y las bombas térmicas, minihidroeléctricas, turbinas eólicas (450 kW a 2 MW), plantas fotovoltaicas mayores de 1 kW, y las centrales de biomasa. Las calderas para las albercas y las aplicaciones geotérmicas fueron excluidas.

Para 1999, se publica bajo el auspicio del Ministerio de Economía y Tecnología, el nuevo Programa. Por varias razones, no se pudo exentar a las plantas del “impuesto ecológico”, no obstante estas fueron apoyadas con dicho ingreso adicional, el cual podría ser usado en beneficio de las tecnologías de energías renovables.

Bajo este esquema, pequeñas y medianas empresas pudieron solicitar concesiones y buenos préstamos para la instalación de colectores solares, calentadores de biomasa, plantas de biogás, y bombas térmicas. Además, las escuelas también podían solicitar concesiones para instalar alguna planta fotovoltaica.

2.2.2.7. Green Electricity

En este programa, se resaltan las primas en las tarifas, esto como una oferta adicional para usuarios y compañías eléctricas. Tales programas no necesariamente van dirigidos a nuevas plantas generadoras con renovables, pudieran ser también dirigidos a plantas ya existentes. Este programa tiene dos fases de divulgación, antes y después de la liberación del mercado eléctrico en 1998.

En la fase inicial, las compañías eléctricas que generaban con energías renovables recibían tarifas especiales. Ellos ofrecían la electricidad con un cargo adicional, y dicho recargo era utilizado para la instalación de nuevas plantas, casi todas fotovoltaicas.

En la segunda fase, todos los productores independientes comenzaron a generar con recursos renovables. En el 2000, 132 diferentes compañías ofrecían “energía verde”.

2.2.2.8. Investing in the Future Programme

Este programa, ofrecía una financiación especial de 2001 a 2003, para la investigación en materia energética en sus diferentes campos. Este financiamiento era adicional a los Programas del Gobierno Federal para la Investigación y Tecnología de la Energía (R&D) financiados a través del presupuesto federal. Las tecnologías beneficiadas por este programa eran: geotermoeléctrica, fototérmica, fotovoltaica y la eólica instalada en mar.

2.2.3. Capacidad Instalada

2.2.3.1. Energía eólica

a. Evolución histórica y situación actual

La capacidad eólica instalada creció en promedio 60.5% por año desde 1990 a 2001, pasando de 48 MW a 8700 MW. El gobierno estima que en 2002 la capacidad total fue de 11.9 GW y las plantas eoloeléctricas produjeron el 3% del total de la generación. Una tercera parte de la capacidad instalada mundial se encuentra en Alemania (*IEA, 2004*).

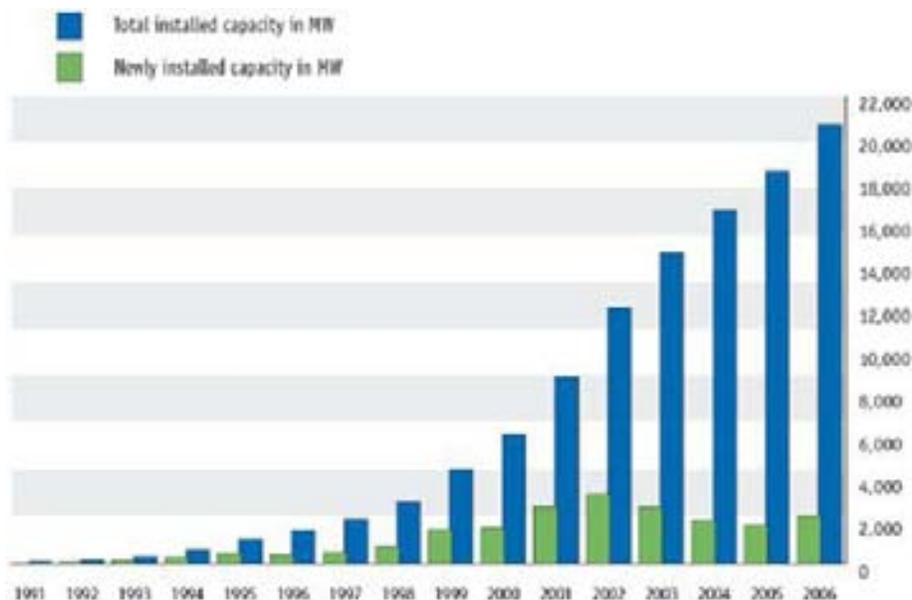
El rápido crecimiento de la energía eólica, ha contribuido al gran desarrollo tecnológico. En promedio, el tamaño de las nuevas centrales eolieléctricas se incrementó de 170 kW en 1992 a casi 1.2 MW en 2001. El desarrollo de mercado de esta tecnología en Alemania, también contribuye al desarrollo técnico a nivel mundial.

Como ya fue mencionado, el programa *250 MW Wind Programme*, tiene su principal interés en el mercado eólico de Alemania. El programa provee la concesión de la instalación y operación de turbinas eólicas apropiadas para el emplazamiento. La última concesión fue aprobada a fines de 1996 para turbinas que fueron conectadas a la red para mediados de 1998. Las concesiones pudieron estar combinadas con remuneraciones bajo la EFL.

El apoyo de la inversión, se proporciona a través de ERP (*Environment and Energy Saving Programme*) así como a través de ERP (*Environment Programme*). Estos programas han incitado considerablemente el reciente desarrollo en la capacidad instalada de la energía eólica. Bajo estos programas, más del 80% del total del costo de inversión pudo ser financiado con una baja tasa de interés, de 1 a 2% debajo del nivel en el mercado actual.

La Figura II.6 nos muestra la capacidad instalada a lo largo de más de una década, especificando la capacidad que se instaló para cada año.

Figura II.6 Evolución de la energía eólica



Fuente: BWE, 2008

2.2.3.2. Energía solar

a. Evolución histórica y situación actual

Fototérmica

La producción térmica solar, creció 25% por año desde 1990 al 2001. El total de la producción para ese año fue de 5400 TJ. Los incentivos gubernamentales desde principios de los 90, han resultado en un acelerado crecimiento. La producción de colectores se duplicó desde 1996.

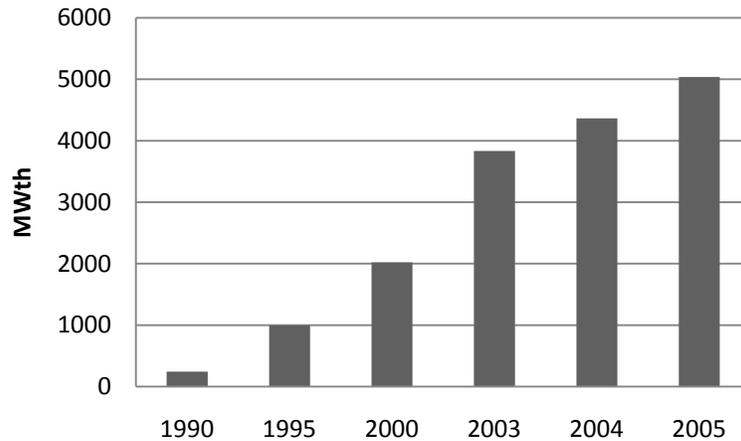
Solarthermie 2000 fue propuesto en 1993 por el Ministerio Federal de Investigación y Tecnología, como parte de este proyecto piloto a gran escala del programa para el desarrollo de sistemas activos a bajas temperaturas, especialmente en los estados federales del este. El objetivo principal de dicho programa, es mejorar la viabilidad económica de los sistemas solares.

En 1995 el programa llamado *100 Million Programme*, fomentó la adquisición de colectores solares y bombas de calor, las cuales fueron concedidas por el Estado por un poco más de 30% del costo de inversión. Desde 1999, el *Market Simulation Programme* ha proporcionado €2/m² por la adquisición de colectores solares.

Los estados federados tienen también que proporcionar un considerable soporte financiero para los colectores térmicos solares, esta cantidad fue de €234 millones entre 1991 y 2001.

La Figura II.7 nos muestra la evolución de la capacidad instalada desde 1991 hasta 2006, además de que se puede observar la tendencia de ésta.

Figura II.7 Evolución de la energía fototérmica



Fuente: El autor con datos de IEA, 2007.

Fotovoltaica

En el periodo de 1990 al 2001, la capacidad fotovoltaica creció poco más del 50% por año, y la generación de electricidad creció cerca del 60% por año. El total de la capacidad instalada fue de 195 MW en 2001. Mientras parte de la energía fotovoltaica, del total de renovables, es usada todavía a pequeña escala, su crecimiento ha sido satisfactorio desde 1990. Una combinación de las tarifas por la alimentación y subsidios para la generación, han estimulado este crecimiento.

En 1991, la publicación del programa a gran escala *1,000 Roofs Programme*, ofreció subsidios para los costos de generación del 60% y 50% en los estados del oriente y occidente respectivamente. Cuando el programa fue completado en 1995, 2100 unidades con una generación pico total de 5.3 MW fueron instaladas. El *1,000 Roofs Programme*, comenzó en 1999 con la meta de incrementar la capacidad en 300 MW para finales de 2003. El objetivo era instalar 1 000 000 de celdas fotovoltaicas con una capacidad promedio de 3 kWp. Cuando dicho programa terminó en julio de 2003, fueron realizadas 55 000 instalaciones, para una capacidad total de 261 MW.

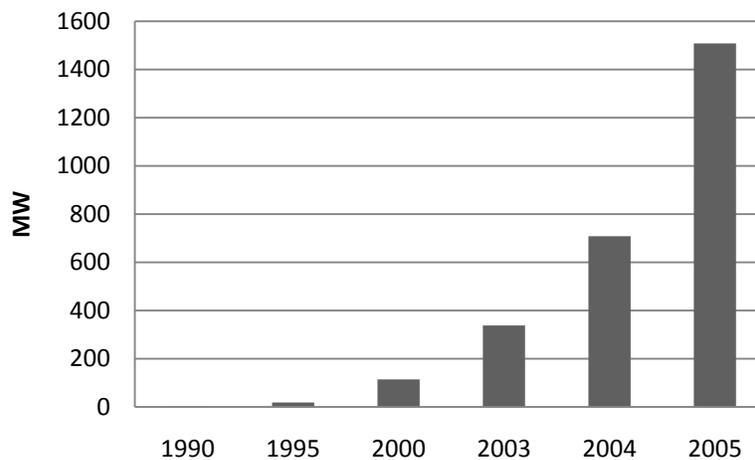
La EFL de 1991, concedió aproximadamente €0.09 por cada kWh que fuera inyectado a la red generado con esta tecnología, aunque fue insuficiente para un adecuado desarrollo. La EEG de 2000, incrementó la remuneración a €0.51/kWh. Esta tarifa decrece anualmente un 5% para sistemas recientemente construidos. Estas remuneraciones, junto con las concesiones y los

pequeños préstamos del programa *1,000 Roofs Programme*, resultaron en un rápido crecimiento de los sistemas fotovoltaicos a partir de 1999.

La tecnología fotovoltaica, ha sido un foco para la promoción pública de RD&D en el campo de las renovables. Programas voluntarios, como el *Green Electricity Programme* y el *Full Cost Rates*, fueron muy importantes en los 90, siendo el puente entre el soporte público y el financiamiento independiente; sin embargo desde la publicación de la EEG, la importancia de estos programas ha disminuido.

En la Figura II.8 podemos observar la evolución de la capacidad instalada con dicha tecnología.

Figura II.8 Evolución de la energía fotovoltaica



Fuente: IEA, 2007.

2.3. Estados Unidos

2.3.1. Políticas públicas y marco regulatorio

2.3.1.1. Evolución histórica

La evolución de la regulación del sector eléctrico en Estados Unidos, comienza con la publicación de *Tennessee Valley Authority Act (TVA)* en 1933. Bajo esta ley, el gobierno federal proporcionó energía eléctrica a los estados, a los condados, a los municipios, y a las cooperativas no lucrativas.

Además autoriza para generar, transmitir, y vender energía eléctrica. Con respecto a la venta de la energía eléctrica, la TVA dio la autorización para establecer contratos hasta 20 años para ventas a entidades privadas y gubernamentales, para la construcción de líneas de transmisión hacia áreas no abastecidas de electricidad, para establecer reglas y regulaciones para la venta y distribución de la energía, y para adquirir instalaciones eléctricas existentes utilizadas en ciertas áreas (PUC, 2008).

Posteriormente en 1935, se decreta la *Public Utility Holding Company Act (PUHCA)* en la cual se hace una reorganización de la industria. Un año después la *Rural Electrification Act (REA)*, establece préstamos y ayuda a las organizaciones que proporcionaban electricidad a las áreas rurales y a las ciudades con población inferior a 2500 habitantes.

Para 1937, la *Bonneville Project Act (BPA)*, inició las administraciones federales de la comercialización de la energía.

La *DOE Organization Act* de 1977, además de formar el Ministerio de Energía, proporcionó autoridad para el establecimiento del *Western Area Power Administration (WAPA)* y le transfirió las responsabilidades en cuanto a la comercialización de la energía y además los activos de la transmisión previamente manejados por el *Bureau of Reclamation*. La autoridad de WAPA fue ampliada con el *Hoover Power Plant Act* en 1984. Esta ley también transfirió las otras 4 administraciones de la comercialización de energías (la administración de la energía del sudeste, la administración de la energía en el sudoeste, la administración de la energía de Alaska, y la administración de la energía de Bonneville) desde el Departamento del Interior al Ministerio de Energía.

Un año después, la *National Energy Act* fue firmada como ley en noviembre de 1978 e incluye cinco diferentes estatutos: la *Public Utility Regulatory Policies Act (PURPA)*, el *Energy Tax Act*, el *National Energy Conservation Policy Act*, el *Powerplant and Industrial Fuel Use Act*, y el *Natural Gas Policy Act*. Llevado a cabo como resultado de la prohibición de exportación de petróleo a los E.E.U.U. por parte de los productores árabes, sus fines generales eran asegurar un desarrollo económico sostenido, mientras que también, el permitir que la economía de aquella época hiciera una transición ordenada desde pasadas fechas, con recursos energéticos baratos, a un período de energía más costosa.

En ese mismo año, se dio a conocer la *Public Utility Regulatory Policies Act (PURPA)*, como respuesta al clima inestable de la energía al final de los años 70. La PURPA intentó promover la conservación de la energía eléctrica, además creó una nueva clase de generadores, los *nonutilities*, que eran los pequeños productores de energía, de los cuales, junto con los cogeneradores calificados, los *utilities*¹⁰ requerían comprar energía.

Al mismo tiempo, se publicó la *Energy Tax Act (ETA)*, la cual avivó la conversión de calderas a carbón y la inversión en equipos de cogeneración y en tecnologías solares y de viento, permitiendo un crédito fiscal encima del crédito fiscal para inversión. Fue ampliado más adelante para incluir otras tecnologías renovables. Sin embargo, los incentivos fueron recortados como resultado de la legislación de la reforma fiscal a mediados de los años 80. Además, se publicó también la *National Energy Conservation Policy Act* de 1978, que exigía que los *utilities* proporcionaran servicios libres de conservación a los consumidores residenciales para animar un crecimiento más lento de la demanda de la electricidad.

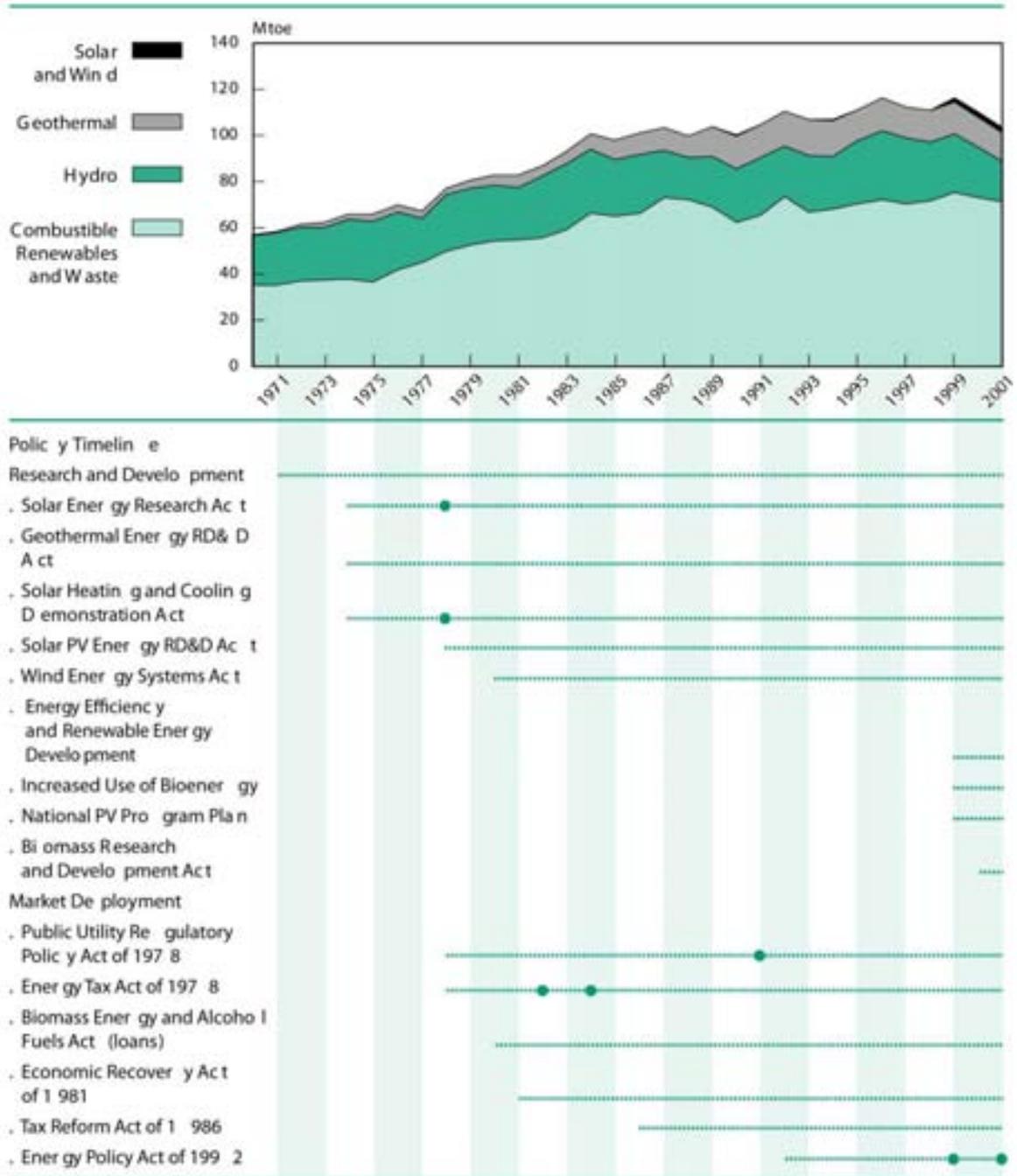
En 1981, la *Economic Recovery Tax Act* introdujo una nueva metodología para determinar deducciones permisibles de la depreciación del impuesto. Esta nueva metodología fija reglas que permite a los contribuyentes demandar abundantes deducciones basadas en la vida depreciable permitida por el sistema, por los métodos, y supuestos del valor salvable. Las plantas de generación, de transmisión, y de distribución de compañías de electricidad reguladas fueron catalogadas como propiedad de *utilities* públicos.

Posteriormente, tras la publicación de una serie de Leyes relacionadas con el sector eléctrico, en 1992 se da a conocer la *Energy Policy Act (EPACT)*, la cual creó una nueva categoría de productor de electricidad: el generador al por mayor exento (EWG), que redujo las restricciones del PUHCA en el desarrollo de la producción eléctrica de los *nonutilities*.

En la Figura II.9, podemos observar la evolución de la generación con energía renovable, además de una línea del tiempo que nos muestra las diferentes políticas en el sector eléctrico.

¹⁰ Empresas relacionadas con la prestación de servicios públicos.

Figura II.9 Evolución de la generación total de energía renovable y las políticas a través del tiempo



Fuente: IEA, 2004

2.3.1.2. Situación actual

Actualmente, Estados Unidos basa su política energética en la *Energy Policy Act* de 2005, que junto con el PURPA de 1978, principalmente, regulan el sector eléctrico del país. Con este marco regulatorio se da la pauta para el desarrollo en materia de recursos renovables.

a. Public Utility Regulatory Policies Act (PURPA)

La Ley de Políticas Regulatorias para la Compañía Pública Eléctrica, creó las primeras reglas de mercado para la generación con energías renovables. La PURPA exige que las compañías eléctricas compren electricidad a pequeños productores que usen energías renovables en centrales generadoras de menos de 80 MW de capacidad nominal. La compra se realiza con base en el costo evitado, éste corresponde al costo que una compañía suministradora incurriría para generar el kWh que le está entregando el pequeño productor (*Borja, 2005*)

b. Renewable Portfolio Standard (RPS)

El Portafolio de Energía Renovable establece que por ley se requiere que cierto porcentaje de la electricidad que vende un suministrador de electricidad sea generado con base en energía renovable (*Department of Energy, 2005*).

El RPS está implementado en 33 estados, esto gracias a que ofrece:

- Integración de las energías renovables en el abastecimiento de energía eléctrica.
- Minimizar las intervenciones gubernamentales en curso.
- Su utilización en la regulación y estructuración del mercado.
- Una eficiente rentabilidad para poder llegar a los objetivos planteados para renovables.

c. Energy Tax Act of 1978

La Ley del Impuesto sobre la Energía, constituye un programa de créditos en impuesto para residencias y compañías que adquirieran equipo para el uso de energías renovables. El impuesto sobre la renta del uso de energía residencial para gastos de equipos con tecnología solar y eólica fue equivalente al 30% en la primera inversión de \$2000 y de 20% para la siguiente de \$8000. El incentivo con mayor importancia en el sector eléctrico fue la creación de un crédito fiscal de 10%

para las compañías eléctricas, para la inversión de diferentes tipos de energía renovable, entre las que se incluían a la solar, eólica y geotérmica. Este crédito fue adicional al 10% de crédito de impuesto de inversión, el cual estuvo disponible para todo tipo de equipos. Los créditos para compañías y residencias, fueron extendidos y en aumento en 1980. El impuesto sobre la propiedad inmobiliaria fue específicamente excluido de los créditos de impuesto que se podían elegir ya que expiraron a finales de 1982 (*IEA, 2004*).

d. Tax Reform Act 1986

Bajo esta legislación, el crédito de impuesto de las compañías eléctricas fue eliminado para los sistemas de energía eólicos, retirados paulatinamente a los de biomasa, y ampliado un 10% (por dos años) para la solar y geotérmica. El crédito del 10% para la energía solar y geotérmica, fue ampliado periódicamente hasta 1992. El crédito de impuesto habitual para las compañías fue además retirado paulatinamente. Por otro lado, los cinco años de depreciación acelerada para las propiedades de energías alternativas fueron liberados aún más, aunque la depreciación en los equipos de cogeneración fue prolongada a 15 o 20 años dependiendo el tipo de equipo (*IEA, 2004*).

e. Energy Policy Act (EPAAct) of 2005

La EPAAct, establece el incremento en un 10% de la energía generada con renovables para el año 2020, a partir de un producción del 8.5% en 2005. Algunos estados tienen un objetivo fijo para la generación con energía renovable o bien, ventas en su jurisdicción que resultan más ambiciosas (*IEA, 2007*).

El uso y la inversión en energías renovables han fomentado el otorgamiento de incentivos a nivel estatal y federal. El gobierno Federal está apoyando a la energías renovables a través de una mezcla de créditos en impuesto, reembolsos y programas R&D.

El desarrollo de las centrales eoloelectricas, está siendo impulsado por una ampliación del crédito fiscal (inicialmente de \$15 por MW generado, pero ajustado por la inflación a una valor actual de \$20 por MW) y pagado para los primeros diez años de vida del proyecto. El monto del crédito fiscal para los productores fue alrededor de \$338 millones en 2005, y se considera que todas las centrales eólicas fueron beneficiadas por éste.

2.3.2. Estrategias seguidas¹¹

Como se ya se mencionó, la industria de las energías renovables inició en respuesta a la primera crisis petrolera de 1973. En 1978, la PURPA creó las primeras reglas de mercado para la generación con recursos renovables. También se instauraron incentivos tales como créditos fiscales para inversionistas, así como otro gran número de incentivos financieros, lo que propició un desarrollo temprano en el campo de las energías renovables (*Borja, 2005*).

Para 1985, las inversiones comenzaron a disminuir drásticamente porque expiraron los créditos en impuestos federales de inversión. Aunado a esto, los precios del petróleo se redujeron y los precios del gas natural se incrementaron menos de lo proyectado, lo que ocasionó que al expirar los contratos a diez años, la base para los costos de electricidad fuera mucho más baja que la proyectada inicialmente. Otro factor que entorpeció el desarrollo energético renovable, fueron las pocas mejoras tecnológicas, que resultaron en costos de generación superiores a los esperados.

Posteriormente, fue hasta 1992 que se comenzaron a dar nuevos avances, el primero con la Ley de Políticas Energéticas (Energy Policy Act, EPAct), siguiéndole una serie de incentivos de tipo económico y financiero, así como incentivos legales y reglamentarios, dándose también los programas de investigación.

2.3.2.1. Solar Energy Research Act

Esta Ley fue aprobada en 1974, el objetivo principal es fomentar, a través de la investigación y desarrollo, el uso de la energía solar como fuente de energía primaria. También proporciona por el desarrollo, un incentivo apropiado, para el uso comercial de la tecnología solar. Además establece la creación de una Coordinación de Energía Solar y Gestión de Proyectos.

2.3.2.2. Solar Heating and Cooling Demonstration Act

Esta Ley fue publicada en 1974. Estipula la instalación de proyectos pilotos en sistemas de calefacción y enfriamiento a nivel comercial, realizados por la NASA y el Departamento de Vivienda y Desarrollo Urbano (HUD).

¹¹ Los programas mencionados en esta sección fueron tomados principalmente del *IEA, 2004*.

2.3.2.3. Solar Photovoltaic Energy Research, Development and Demonstration Act

Esta Ley, publicada en 1978, restablece y fomenta los programas para la investigación y desarrollo de la energía en los sistemas fotovoltaicos, con el objeto de acelerar el uso generalizado de sistemas fotovoltaicos en los mercados internacionales.

2.3.2.4. Wind Energy Systems Act of 1980

Esta Ley fue establecida como un programa de ocho años, el cual se centró en la investigación, desarrollo y programas destinados a las aplicaciones de la tecnología eólica para la generación de electricidad. El propósito de esta Ley era reducir el costo promedio de la electricidad generada por centrales eolieléctricas, hasta alcanzar por lo menos 800 MW de capacidad instalada en 1988. Además buscaba acelerar el crecimiento de la viabilidad comercial de estos proyectos y su competitividad en el mercado.

2.3.2.5. Economic Recovery Act of 1981

En esta Ley se plantea que la depreciación del equipo permite deducir la pérdida de valor activo en un cierto plazo, es decir, corresponde a la porción de una inversión que se puede deducir del impuesto sobre la renta en cualquier año dado. Esto se contemplaba sólo para las centrales solares, eólicas y geotérmicas.

La Ley de Recuperación Económica, permitió la depreciación acelerada de las centrales mencionadas en un periodo de cinco años. La depreciación acelerada disminuye el pago de impuesto durante los primeros años de un proyecto y por consiguiente es preferida por los inversionistas.

2.3.2.6. Energy Efficiency & Renewable Energy Development

Esta legislación proporciona un incremento, fundado en la investigación, desarrollo y proyectos piloto con tecnologías renovables. Adicionalmente, ésta incluye un plan de inversión de cerca de \$1.4 billones de dólares para la investigación, desarrollo y la utilización de energías limpias. El

programa aumenta la existencia de incentivos, tales como el “Incentivo Bioenergía” para el desarrollo de dichas tecnologías.

2.3.2.7. Tax Relief Extension Act 1999

La Ley aprobada en 1999, extendía la fecha de expiración de los créditos en impuesto para la producción, creados en el EAct de 1992, hasta el 31 de diciembre de 2001. También se expandía el crédito fiscal para dar facilidades al uso de desechos agrícolas.

2.3.2.8. Energy for the New Millennium: National Photovoltaics Program Plan

Este programa, aprobado en 1999, se basaba en fomentar la investigación y desarrollo de las nuevas tecnologías fotovoltaicas, como son, dispositivos con alto rendimiento, materiales de silicio, técnicas de caracterización, células de películas delgadas y otros innovadores conceptos.

2.3.2.9. Funding to accelerate the use of Wind Energy–Information Campaigns

En el 2002, El Departamento de Energía dio un subsidio para ayudar a la promoción del desarrollo de la energía eólica a través de los estados, con el objetivo de crear campañas de información sobre el recurso eólico.

2.3.3. Capacidad Instalada

La contribución de las fuentes renovables de energía a la energía primaria del país fue escasa en el periodo de 1990 al 2000, esto debido a su baja producción. La participación de las energías renovables se mantuvo estable hasta el 2004, y fue entre los años 2005 y 2006 que tuvo un crecimiento acelerado en materia de generación eléctrica y transporte. El reciente crecimiento, se debe a una mezcla del rápido aumento de los precios de los hidrocarburos desde 2004, de la profunda preocupación del cuidado del ambiente, el aumento de la disponibilidad del recurso hidráulico después de la temporada de sequía en los años 2000 y 2001, y el amplio apoyo de las políticas.

2.3.3.1. Energía eólica

a. Evolución histórica y situación actual

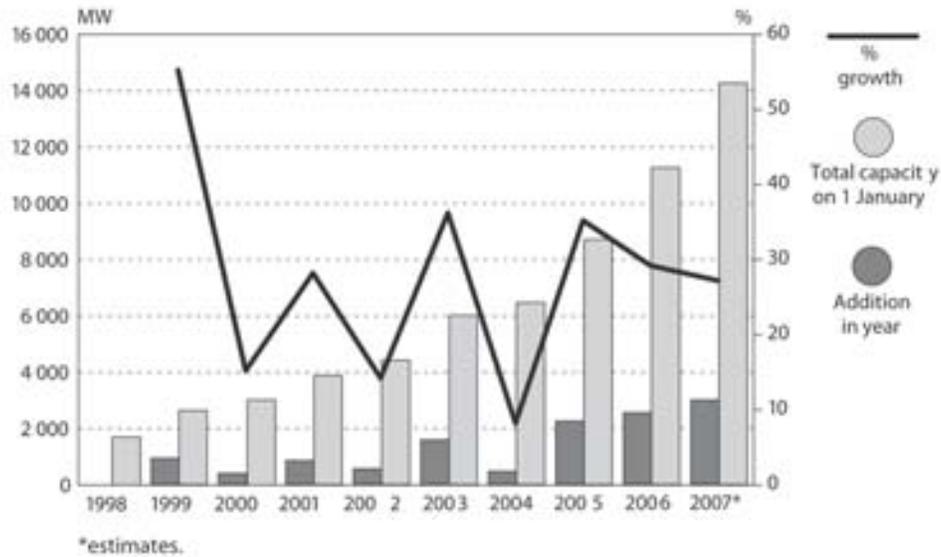
El rápido crecimiento del uso de las fuentes de energía renovable para el abastecimiento eléctrico, se dio principalmente en la energía eólica. La generación con este tipo de energía representó un 2.3% de la generación con renovables en 2001. La generación creció de 3.1 TWh en 1990 a 6.8 TWh en 2001. La capacidad instalada también se incrementó, pasando de 1911 MW en 1990 a 3864 MW en 2001 (*IEA, 2004*).

El mercado eólico experimentó dos periodos de gran crecimiento. En 1978, con la aprobación de la PURPA, y en 1992 cuando se estableció el Crédito Fiscal para la Producción (*Production Tax Credit, PTC*). California fue el primer estado en el que se observó un pronto crecimiento en el primer periodo, donde posteriormente se fueron anexando otros estados. Posteriormente, a finales de los años 90, la industria eólica presenta una gran difusión gracias a la combinación del PTC, establecido en 1992, la continua depreciación, y las políticas adoptadas en algunos estados, tales como el RPS. Por ejemplo, en 2001, cerca de 1000 MW fueron instalados en Texas.

Actualmente, la intermitencia en el servicio no es un obstáculo serio para los proyectos eólicos, esto debido a que la energía puede ser inyectada a red sin mayor dificultad. El apoyo se dio gracias al acuerdo entre las compañías eléctricas y generadoras, junto con el gobierno federal que trabajaron en colaboración para la discusión de los temas relacionados al crecimiento de dicho energético en un futuro, para así poder abastecer junto con las plantas hidroeléctricas.

A partir de estos antecedentes, se dio un acelerado crecimiento. Para 2003, ya se tenía una capacidad instalada de casi 6000 MW. Posteriormente, en 2005 se instalaron 2431 MW, seguidos de 2343 MW en 2006, y finalmente por el 2007 se tenía una capacidad total instalada de 15 616 MW (Figura II.10). Con estas cifras, los Estados Unidos de América, se sitúan como el tercer país del mundo con mayor capacidad instalada con esta tecnología.

Figura II.10 Evolución de la capacidad instalada eólica



Fuente: IEA, 2007.

2.3.3.2. Energía solar

a. Evolución histórica y situación actual

Fototérmica

El crecimiento durante la década de 90 que tuvo el uso de energía térmica a partir de la radiación solar, fue de 2387 TJ en 1990 a 58 872 TJ en 2001, con un promedio anual de crecimiento del 34%, reflejándose en una capacidad instalada de alrededor de 650 MWt.

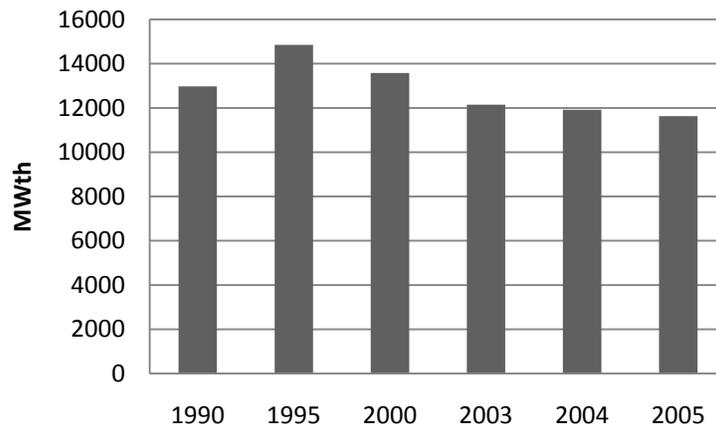
El uso del calentamiento del agua con energía solar en los Estados Unidos, es una tecnología madura, que ganó interés durante la crisis energética de los 1970. Durante ese tiempo, la colaboración federal y estatal a través de incentivos, estimuló a los consumidores y a las compañías a instalar sistemas fototérmicos, lo cual resultó en la instalación de más de un millón de calentadores solares.

Posteriormente, gracias a los programas publicados por el Departamento de Energía, así como los bajos costos en la obtención de dichas tecnologías, o bien con los créditos otorgados para las nuevas instalaciones, se dio un incremento en la utilización de la energía solar térmica.

El único proyecto comercial fototérmico, fue instalado en California entre 1984 y 1990, el cual empleaba un colector parabólico. En total 354 MW fueron instalados por la misma empresa, la cual tomó una ventaja favorable de la PURPA.

Actualmente, aunque no se tiene disponible una cifra exacta de la energía térmica solar, se estima que tuvo un crecimiento que pasó de 721 000 m² de colectores en 1997 a 1 815 000 m² en 2006, teniendo un crecimiento de 152%. La Figura II.11 nos muestra la evolución de la energía solar térmica.

Figura II.11 Evolución de la energía fototérmica



Fuente: IEA, 2007.

Fotovoltaica

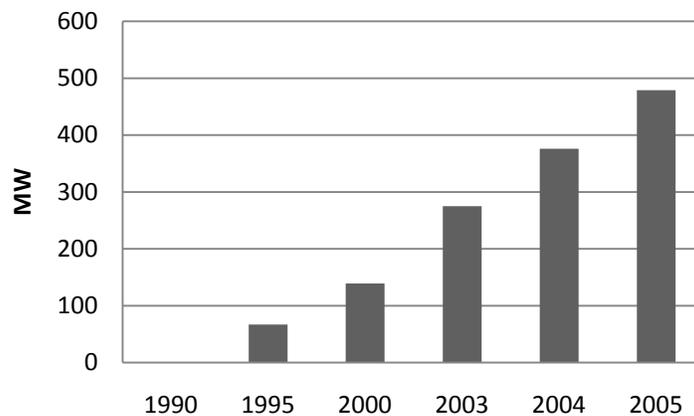
Los sistemas fotovoltaicos tuvieron un crecimiento anual del 20% de 1990 al 2001, alcanzando así una capacidad de 213 MW.

Las políticas que han fomentado el desarrollo del mercado fotovoltaico incluyen el gasto destinado a la investigación y desarrollo para ayudar a la reducción del costo a largo plazo de la tecnología, además del 10% de crédito fiscal para inversión y la acelerada depreciación disponible a las compañías. Estos dos incentivos financieros, pudieron incrementar a 42% el impuesto capital, beneficiando así los primeros cinco años de operación del sistema.

También el sistema de interconexión a la red tuvo un crecimiento. Si bien este crecimiento fue fuerte en varios estados, en general el crecimiento de la generación sólo fue sólo de 20% en 2002, año en el que la generación del resto de las diferentes naciones creció en promedio 57%.

Finalmente, el periodo comprendido de 2003 al 2007, fue un periodo en el que no tuvo gran crecimiento, ya que paso de 397 MW instalados a 498 MW. En la Figura II.12 observamos la evolución de la energía fotovoltaica.

Figura II.12 Evolución de la energía fotovoltaica



Fuente: IEA, 2007.

Conclusiones

En el presente capítulo se estudiaron las políticas públicas, el marco regulatorio y la situación actual de la capacidad instalada de generación de energía eléctrica a partir de recursos eólicos y solares en España, Alemania y Estados Unidos

Para los tres países se pudo observar que a raíz de los diversos cambios en las políticas públicas, la capacidad instalada para ese periodo aumentaba. Esto gracias también a las estrategias que se llevaron a cabo. En general, los programas se dirigían a otorgar incentivos económicos y créditos, resaltando también el gran apoyo a la investigación y desarrollo para las tecnologías correspondientes.

En el caso particular de la energía eólica, los tres países estudiados son los que cuentan con la mayor capacidad instalada en el mundo. Alemania, es el país que encabeza la lista, y como se pudo apreciar, fue el país en que los esfuerzos por comenzar la transición energética se dieron primero. Estados Unidos, a pesar que creó una regulación apropiada para dar impulso a los recursos renovables, no lo llevó a cabo con gran apego por diversos factores, por lo que es hasta el año 2000 que comienza a tener un crecimiento acelerado. Por otra parte España hace lo correspondiente para contribuir con el compromiso mundial, y ahora es la segunda potencia en dicho campo.

El uso de la energía solar, también juega un papel importante en los países estudiados, aunque con menor crecimiento al esperado, pero se puede observar que se han llevado a cabo diversos programas de apoyo para el aprovechamiento exclusivo de este recurso, y además se prevé una mayor divulgación y apoyo para estas tecnologías.

Con lo estudiado en este Capítulo, se puede tener un panorama general de las políticas que contribuyen al desarrollo de la energía renovable, esto con fin de poder tener un punto de comparación cuando se analice la situación de México.

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

Capítulo 3

**Potencial de recursos energéticos eólicos y solares
en México para la generación de energía eléctrica**

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

3. Potencial de recursos energéticos eólicos y solares en México para la generación de energía eléctrica

Introducción

En el presente capítulo estudiaremos lo referente a la evaluación de los recursos energéticos eólicos y solares, basándose en una metodología general que será descrita para luego ser utilizada en la evaluación del potencial de estos recursos en México.

El primer apartado del capítulo lo dedicaremos a estudiar una metodología general conformada por métodos y modelos que utilizan las características de los recursos renovables para poder evaluar su potencial. Para el caso del recurso eólico, se utiliza una metodología conformada por cuatro métodos: 1) Medicación del viento, 2) Evaluación y análisis de datos, 3) Clasificación del potencial eólico y el 4) sistema de mapeo. Por otro lado, se presenta lo relacionado al recurso solar, donde la metodología sigue tres métodos principales: 1) Medición de parámetros meteorológicos, 2) obtención de datos de radiación y 3) sistema de mapeo.

El segundo apartado está dedicado a la presentación de los recursos energéticos eólicos con los que cuenta México. Principalmente se observarán las regiones del país que cuentan con un potencial considerablemente aprovechable, en donde la evaluación del recurso ha sido favorable. Es decir, se mostrarán los resultados obtenidos de los estudios que se han ido realizando a través del tiempo para la determinación del potencial energético en nuestro país. Cabe resaltar que se analizará solamente la región del Istmo de Tehuantepec, ya que es la zona que cuenta con el mayor número de estudios debido a su gran potencial.

Por último se realiza el mismo tipo de análisis anteriormente expuesto, pero ahora para el recurso solar. En esta sección se presentan los resultados más representativos de la evaluación hecha con la metodología de la bibliografía *II, 2005*, la cual es la más consultada para la realización de proyectos.

3.1. Recursos energéticos eólicos y solares

3.1.1. Metodología general para la evaluación de recursos eólicos

El recurso eólico queda determinado mediante actividades como: ubicación de los sitios factibles y su extensión superficial en hectáreas, características topográficas del emplazamiento, rosa de los vientos, vientos energéticos, rumbos dominantes, etc., lo que permite configurar la distribución topográfica de los aerogeneradores y determinar un índice de capacidad instalable por hectárea que, multiplicado por la superficie total, indica la capacidad total instalable en el sitio (*Guillen, 2004*).

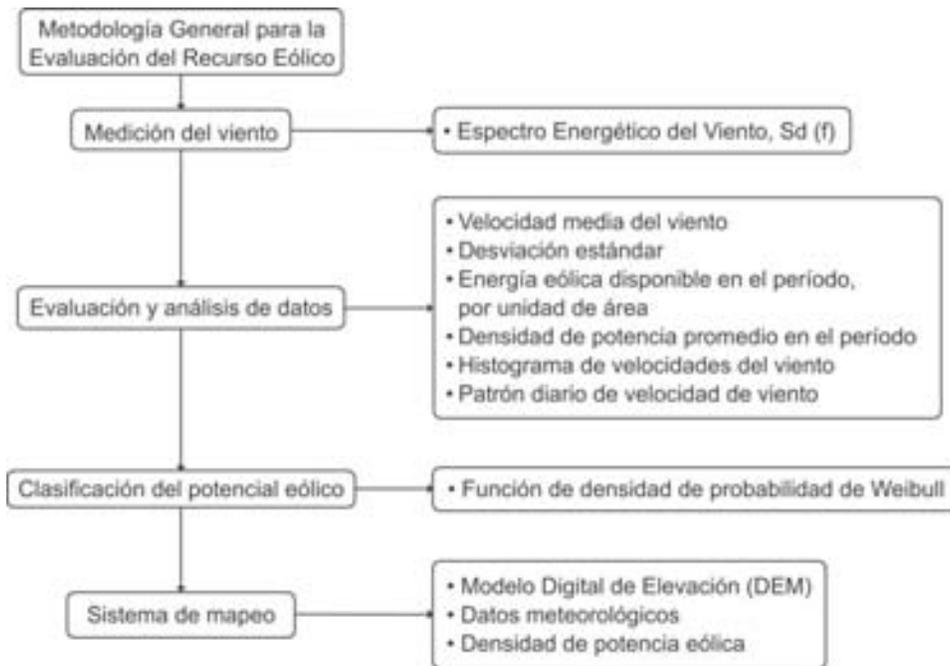
La velocidad media del viento en el sitio es indicativa de la magnitud del recurso posible y por lo tanto, de la generación bruta esperada en kWh/año. Este procedimiento cuantificaría reservas probables, la caracterización detallada, a nivel de estudio de factibilidad, demostraría una reserva probada.

Para mayor información acerca de las características del viento necesarias para la evaluación de este recurso, consultar el Anexo III.1.

3.1.1.1. Descripción general de la metodología

El diagrama de flujo mostrado en la Figura III.1, nos muestra una idea general de los métodos y modelos que conforman la metodología general.

Figura III.1 Metodología general para la evaluación de recursos eólicos



Fuente: El autor con información de NREL, 2003

3.1.1.2. Medición del viento

En la práctica, la cantidad de energía eólica disponible en un sitio y su densidad de potencia, se derivan de mediciones de la velocidad del viento. Existen muchos tipos de mediciones, pero con ayuda del análisis del espectro energético del viento $S_d(f)$, se tiene el método adecuado (IIE y UNAM, 1998).

La medición de la velocidad y dirección del viento en el sitio de posible explotación, es necesaria por lo menos durante un año. Esto con el fin de conocer las variaciones a escala estacional. Así mismo, es conveniente conocer las variaciones que el recurso eoloenergético podría presentar a lo largo de los años, por ejemplo, durante la vida útil de una central eoloeléctrica, es decir, de 20 a 25 años. Cuando no se cuenta con mediciones históricas en el sitio, es posible realizar la estimación de las variaciones a largo plazo utilizando datos de estaciones climatológicas cercanas, siempre y cuando la información disponible se valide y se establezcan las correlaciones con el sitio específico.

La medición del viento, para fines de su aprovechamiento energético, se realiza a una altura mínima

de 10 metros sobre el terreno. La altura de medición busca medir un flujo no perturbado, por lo que la ubicación y exposición del anemómetro debe ser seleccionada de manera cuidadosa, con el fin de evitar que se midan flujos perturbados por obstrucciones. En todos los resultados y bases de datos que se deriven de mediciones anemométricas, es muy importante que se haga referencia a la altura de medición y a la ubicación exacta del anemómetro.

a. Espectro Energético del Viento, $S_d(f)$ (Auto Power Spectral Density, APSD)

La función $S_d(f)$, es la transformada de Fourier de la autocorrelación $C(t, t) = V(t)V(t+t)$, con respecto a t . Su valor es una medida de la energía contenida en las fluctuaciones con período $T=2\pi t$, mismo que se muestra en la Figura III.2. La interpretación física del espectro es la siguiente: toda el área bajo la curva representa la variancia total (el cuadrado de la desviación estándar, σ^2) del viento, por lo mismo, el valor local de S_d es representativo de la contribución a la variancia total de las fluctuaciones con período T . Lo que es evidente en la Figura es que hay muy poca contribución a σ^2 para los períodos comprendidos entre 2 horas y 5 minutos. Esto se conoce como la depresión espectral del espectro energético del viento, cuyo valor mínimo se alcanza para períodos de 10 minutos. Por ello, la velocidad promedio del viento en 10 minutos se ha considerado como la velocidad estacionaria. Las fluctuaciones asociadas con períodos mayores de 2 horas, representan procesos macro-meteorológicos (ciclos de insolación, frentes, tormentas), mientras que las fluctuaciones asociadas con períodos menores que 5 minutos representan procesos micrometeorológicos (rachas, turbulencia).

Para mediciones discretas, la velocidad estacionaria se obtiene por medio de:

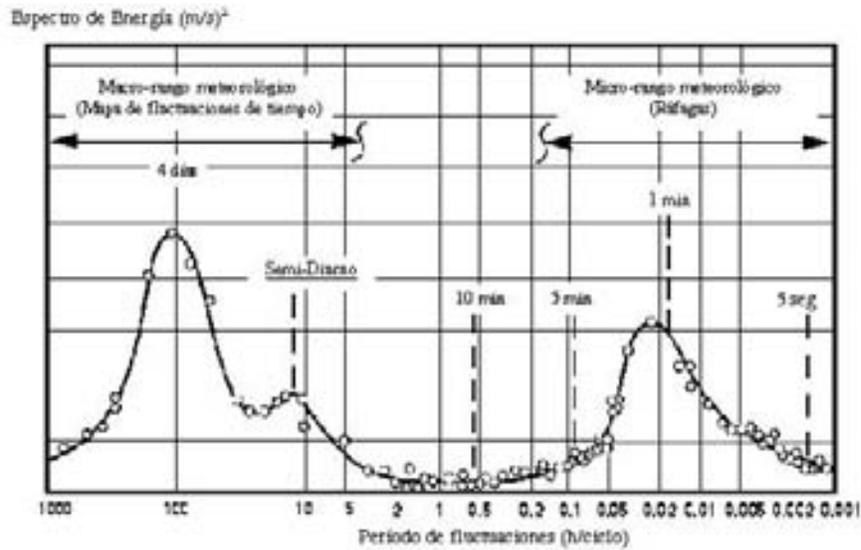
$$V_e = \frac{1}{N} \sum_{-j}^N v_i$$

donde:

N = número de muestras de la velocidad del viento durante un intervalo de 10 minutos (de preferencia 600, ver abajo).

v_i = los valores medidos de la velocidad del viento, en el intervalo de 10 minutos, con una frecuencia $fm=1$ Hz, o bien, para un anemómetro de copas $0.5 \text{ Hz} < fm < 2 \text{ Hz}$.

Figura III.2 Espectro energético del viento



Fuente: IIE y UNAM, 2005

Y por lo tanto, la desviación estándar de las muestras con que se obtiene la velocidad estacionaria queda dada por:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{-j}^N (v_i - V_e)^2}$$

La intensidad de la turbulencia se define como:

$$I_o = \frac{\sigma_e}{V_e}$$

En relación con el desempeño de los aerogeneradores, las variaciones de la velocidad estacionaria no afectan su respuesta dinámica, ya que la turbina se puede ajustar a ellas. Las fluctuaciones turbulentas sí excitan la dinámica de las turbinas, y son de suma importancia para el diseño de la estructura en cuanto a fatiga.

3.1.1.3. Evaluación y análisis de datos

La evaluación y el análisis de los datos, se realiza con el fin de cuantificar el recurso eólico durante períodos diarios, mensuales, estacionales, anuales y multi-anuales. El objetivo central, es el

desarrollar un modelo conceptual de los fenómenos físicos a escala regional y local, que se ve influenciado por el flujo del viento. Así, el modelo puede ser usado cuando se tenga algún problema en el análisis de las características del viento, y usar las evidencias meteorológicas de la región en dicho modelo (*NREL, 2003*).

a. Velocidad media del viento

La velocidad media del viento varía entre 3 y 7 m/s, según diversas situaciones meteorológicas; es elevada en las costas, más de 6 m/s, así como en algunos valles más o menos estrechos. En otras regiones es, en general, de 3 a 4 m/s, siendo bastante más elevada en las montañas, dependiendo de la altitud y de la topografía (*Fernández, 2001*). El siguiente modelo nos muestra cómo se calcula:

$$\bar{V}_T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_{e_i} \text{ [m/s]}$$

donde:

N = número de intervalos de 10 minutos en el período T

V_e = datos (continuos) de la velocidad estacionaria en el período T

b. Desviación estándar

La desviación estándar es una medida cuadrática de dispersión para variables de razón y de intervalo, la cual informa de la media de distancias que tienen los datos respecto de su media aritmética, expresada en las mismas unidades que la variable. Para nuestro caso, se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_{e_i} - \bar{V}_T)^2} \text{ [m/s]}$$

c. Energía eólica disponible en el período, por unidad de área

La energía eólica disponible, depende de la densidad del aire y de la velocidad estacionaria. El modelo siguiente nos indica cómo calcularla:

$$\frac{E_{D.T}}{A} = \frac{1}{12} \rho_s \sum_{i=1}^N V_e^3$$

d. Densidad de potencia promedio en el período

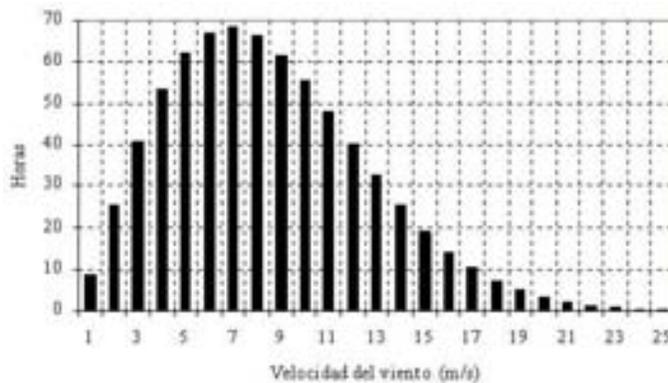
La densidad de potencia promedio, se obtiene con el siguiente modelo:

$$\frac{\bar{P}_T}{A} = \frac{1}{2N} \rho_s \sum_{i=1}^N V_e^3 \quad [\text{W/m}^2]$$

e. Histograma de velocidades del viento

Este histograma indica la frecuencia con que la velocidad estacionaria del viento (V_e) ocurre para clases de velocidad con un tamaño de 1 m/s. Usualmente, la frecuencia de ocurrencia se presenta en horas sobre un período mensual o anual (Figura III.3). El histograma es de gran utilidad, ya que al relacionarlo con la curva de potencia de un aerogenerador se puede estimar el potencial de generación de electricidad.

Figura III.3 Ejemplo del histograma de velocidad de viento para un período mensual

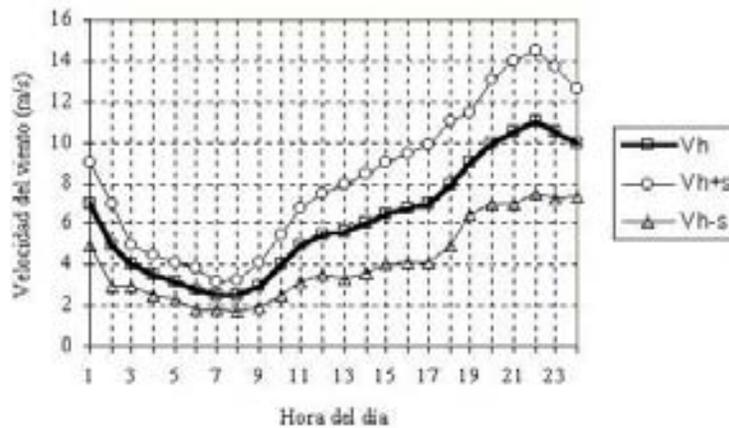


Fuente: IIE y UNAM, 1998

f. Patrón diario de velocidad de viento

Es una gráfica que indica el comportamiento típico del viento a lo largo del día, durante períodos mensuales (Figura III.4). Es de gran utilidad para conocer la correlación entre el recurso eólico, y por consecuencia la del potencial de generación eoloeléctrica, con la demanda. Obviamente, en el análisis económico de proyectos, esto resulta de gran utilidad para estimar la posible facturación cuando se aplican estructuras tarifarias horarias a lo largo del día.

Figura III.4 Ejemplo del patrón diario de velocidad de viento para un período mensual



Fuente: IIE y UNAM, 1998

3.1.1.4. Clasificación del potencial eólico

Los valores de los mapas de los recursos eólicos están basados en la densidad de potencia del viento, y no en la velocidad de éste. Esto debido a que la densidad del aire, es mejor indicador del recurso disponible, ya que integra la distribución de frecuencia de la velocidad del aire, la dependencia del potencial eólico a la densidad del viento, y el cubo de la velocidad del viento (NREL, 2003).

El potencial eólico, se puede clasificar con ayuda de la función de densidad de probabilidad de Weibull. La Tabla III.1 nos muestra la respectiva clasificación del recurso que se ocupa en atlas eólicos.

Tabla III.1 Clasificación del recurso eólico (50 m de altura, k= 2)

Clase	Densidad de potencia media anual [W/m ²]	Velocidad media anual [m/s]
1	0 – 200	0 – 5.6
2	200 – 300	5.6 – 6.4
3	300 – 400	6.4 – 7.0
4	400 – 500	7.0 – 7.5
5	500 – 600	7.5 – 8.0
6	600 – 800	8.0 – 8.8
7	800 – 2000	8.8 – 11.9

Fuente: IEE y UNAM, 1998

a. Función de densidad de probabilidad de Weibull

Con fines de pronóstico del recurso eólico, el histograma de velocidad de viento, se puede aproximar por la función de densidad de probabilidad de Weibull, la cual queda dada por:

$$P(V_e) = \frac{k}{c} \left(\frac{V_e}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V_e}{c}\right)^k\right]$$

donde:

V_e = velocidad estacionaria del viento

k = factor de forma de la función de densidad de probabilidad de Weibull

c = factor de escala de la función de densidad de probabilidad de Weibull

Los factores k y c se relacionan con los resultados de mediciones anemométricas mediante:

$$\frac{\bar{V}_T}{c} = \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

$$\frac{\sigma_T}{\bar{V}_T} = \frac{\sqrt{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right]}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}$$

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} \exp(-t) dt$$

donde:

\bar{V}_T = Promedio de la velocidad estacionaria del viento en el período T

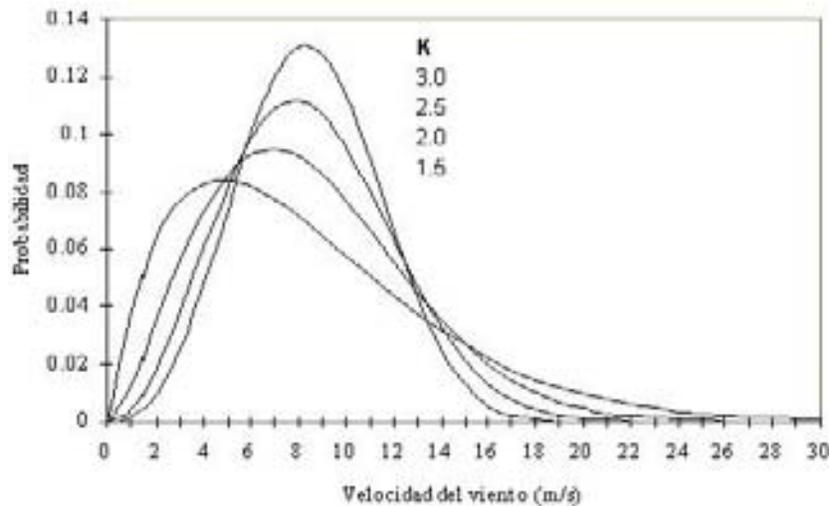
σ^2 = desviación estándar de la velocidad estacionaria del viento en el período T

De manera aproximada, k puede calcularse por medio de la expresión:

$$k \approx \left(\frac{\sigma_T}{\bar{V}_T} \right)^{-1.086} \text{ para } 0.3 \leq \frac{\sigma}{\bar{V}_T} \leq 1$$

En la Figura III.5 se muestra una familia de curvas de la función de densidad de probabilidad de Weibull para una velocidad promedio del viento igual a 8 m/s. Como se puede apreciar, un valor más alto de k indica un régimen de viento más constante, es decir, la velocidad del viento tiene relativamente poca desviación con relación a su valor promedio. Un valor bajo de k indica lo contrario.

Figura III.5 Ejemplo de una familia de curvas de la función de densidad de probabilidad de Weibull para una velocidad media de 8 m/s



Fuente: IIE y UNAM, 1998

Básicamente, la función de densidad de probabilidad de Weibull se utiliza con fines de pronóstico a largo plazo, por ejemplo, la estimación del potencial de generación de electricidad de una central eoloelectrónica para toda su vida útil. La estimación histórica (la cantidad de electricidad que se hubiera generado para un régimen de viento ya medido) es, sin duda, más conveniente realizarla utilizando los datos reales. Es conveniente que la función de densidad de probabilidad de Weibull que se utilice para pronósticos a largo plazo sea derivada de mediciones durante varios.

3.1.1.5. Sistema de mapeo

El sistema de mapeo se lleva a cabo con programas de computadora especializados, los cuales están conformados por extensas rutinas científicas guiadas por modelos para la evaluación del recurso eólico. El método está dividido en tres principales componentes: los datos de entrada, los ajustes y la obtención de los mapas.

Los datos de entrada se toman de dos modelos, el terreno digitalizado y los datos meteorológicos. Los ajustes se hacen a través de cálculos de la densidad de potencia del viento, siguiendo el modelo correspondiente. Finalmente para la obtención de los mapas, se utiliza un código de colores para la representación de la potencia eólica en W/m^2 y la velocidad del viento equivalente para cada celda individual.

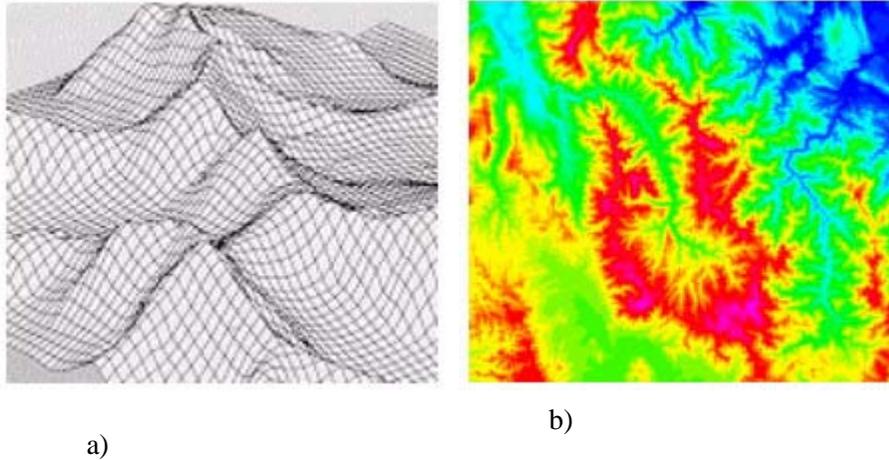
a. Modelo Digital de Elevación (DEM)

El nombre de Modelo Digital de Elevación implica una representación de las elevaciones del terreno mediante valores numéricos, generalmente esta representación es una forma simplificada de la geometría de la superficie del terreno. Consiste en una serie de puntos con coordenadas conocidas referenciadas a un sistema de coordenadas bidimensionales a las que se les asocia un valor de elevación. Los puntos deben estar espaciados y distribuidos de modo regular, de acuerdo con un patrón que corresponde a una cuadrícula (INEGI, 2000).

Los valores de elevación pueden ser manipulados digitalmente y desplegados en un monitor como una malla (o como un conjunto de celdas), a la que se asocian los valores de altura a cada una de las intersecciones de líneas de la malla. Para este caso, la presentación visual es una vista isométrica. Para el caso de que a las celdas de una cuadrícula *raster* se le asignen los valores correspondientes a los intervalos de alturas diferenciados por gamas, ya sea de tonos de gris o de colores, la

presentación gráfica puede ser en dos o tres dimensiones (Figura II.6).

Figura III.6 a) Representación tipo malla en vista isométrica
b) Representación en dos dimensiones por medio de tonos



Fuente: INEGI, 2000

b. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos para el sistema de mapeo se llevan a cabo en dos fases. En la primera, se entregan los datos para cada celda de la malla obtenida de modelos numéricos de mesoescala¹². En la segunda fase, se sigue el proceso de rastreo, en el cual se realizan los esbozos verticales apropiados de la densidad de potencia eólica y la rosa de los vientos, que nos expresa el porcentaje total del potencial del viento de acuerdo a su dirección.

c. Densidad de potencia eólica

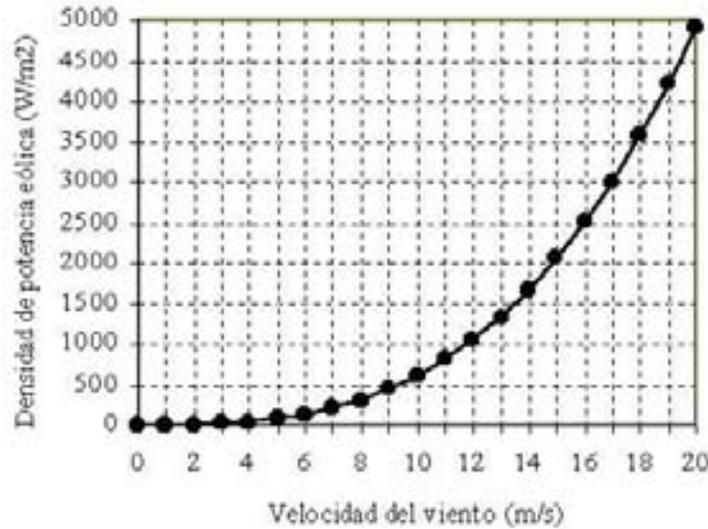
La potencia por unidad de área, o bien, la densidad de potencia eólica, determina la potencia que experimenta un rotor aerodinámico de eje horizontal por unidad de área de barrido y se expresa:

$$\frac{P_e}{A} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \rho_a v_i^3$$

¹² Estudio de sistemas del tiempo atmosférico más pequeños que la escala sinóptica meteorológica, pero más grandes que la microescala y la escala de tormenta de los sistemas de nubes cúmulos.

donde n , es el número de registros en el intervalo de promedios. Como se puede notar la potencia del viento es directamente proporcional al cubo de su velocidad (Figura III.7).

Figura III.7 Densidad de potencia eólica
(para una densidad del aire igual a 1.225 kg/m^3)



Fuente: IIE y UNAM, 1998

Esta ecuación es válida sólo para los registros medidos individualmente (horarios, 10 minutos, etc.) y no para grandes periodos como mensual o anual.

Es importante notar que la densidad de potencia eólica es directamente proporcional a la densidad del aire, la cual para un sitio dado, es inversamente proporcional a la temperatura ambiente (T) y directamente proporcional a la presión atmosférica (P). Por lo cual, disminuye con la altura sobre el nivel del mar.

$$\rho = \frac{P}{R T}$$

donde la R representa la constante específica del aire con un valor de $287 \left[\frac{J}{kg K} \right]$.

Para la evaluación del recurso eólico en un sitio determinado la densidad del aire puede calcularse mediante:

$$\rho_s = 1.225 \left(\frac{288.15}{T_s} \right) \left(\frac{P_s}{1013.3} \right) \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

3.1.2. Metodología general para la evaluación de recursos solares

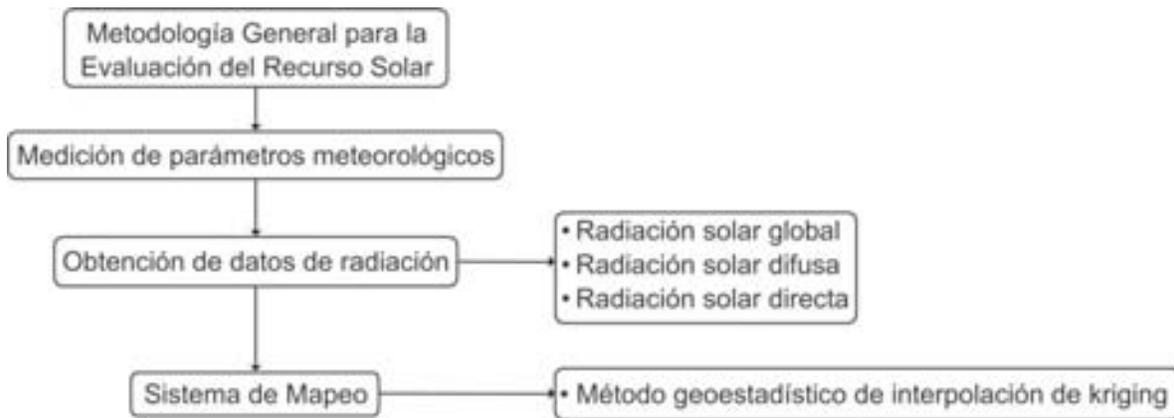
El recurso solar está en función de la radiación solar, la cual es el resultado de las reacciones de fusión en los átomos del sol, dando lugar a la liberación de gran cantidad de energía, la cual llega a la Tierra en forma de radiación. La radiación es la se puede transformar directamente en electricidad (fotovoltaica) o calor (termosolar).

La radiación solar tiene una serie de características útiles para tomarlos como parámetros en la evaluación del recurso solar, éstas se encuentran descritas con más detalles en el Anexo III.2.

3.1.2.1. Descripción general de la metodología

En el diagrama de flujo mostrado en la Figura III.8, podemos observar los métodos y modelos que conforman la metodología general y que se explican a continuación.

Figura III.8 Metodología general para la evaluación de recursos solar



Fuente: El autor con información de NREL, 2003

3.1.2.2. Medición de parámetros meteorológicos

Se comienza con la recopilación de datos meteorológicos, de ser posible, de todas estaciones meteorológicas de la localidad a estudiar. Se debe contar por lo menos con datos de más de 5 años, ya que si no la estadística generada será pobre y los datos obtenidos poco confiables. Los datos recabados, son principalmente las horas de insolación, temperatura, humedad, relativa, nubosidad y pluviosidad. Cabe mencionar, que las imágenes de satélite tienen menor nivel de incertidumbre (II, 2005).

3.1.2.3. Obtención de datos de radiación¹³

Las mediciones directas de la radiación solar son la mejor fuente de información, sin embargo, debido a los costos de la instrumentación y de su operación y mantenimiento, no se utilizan como la principal fuente de información. Debido a esto, se han desarrollado modelos empleando datos climatológicos, con los cuales es posible calcular la radiación solar global, la radiación difusa y directa incidente sobre la superficie horizontal de la Tierra.

a. Radiación solar global sobre superficies horizontales

Una de las primeras expresiones desarrolladas fue la regresión de Ångström (1924) que relaciona la radiación solar promedio diaria mensual para días claros y la radiación para un lugar dado con el promedio de la fracción de las horas de insolación medidas y la duración teórica del día, siendo la ecuación la siguiente:

$$\frac{\bar{H}}{Hc} = a' + b' \frac{\bar{n}}{N}$$

donde:

\bar{H} = Radiación promedio diaria mensual sobre una superficie horizontal

Hc = Radiación promedio diaria para días claros para el lugar y la fecha dados

a' y b' = Constantes empíricas

\bar{n} = número de horas de insolación promedio diario mensual

N = Promedio diario mensual del máximo número de horas posible de insolación (duración del día)

¹³ Esta sección se basa, en su mayoría, en los modelos estudiados en la bibliografía del *MME*, 2005.

promedio del mes)

Una dificultad básica de esta ecuación está en la incertidumbre con que se determine H_c para un día claro.

Para 1964, Page y otros investigadores, modificaron la ecuación para reemplazar la radiación de un día claro por la radiación incidente sobre una superficie horizontal en el límite superior de la atmósfera, es decir:

$$\frac{\bar{H}}{H_o} = a + b \frac{\bar{n}}{N}$$

donde H_o es la radiación solar fuera de la atmósfera para la misma localización, promediada sobre el mismo período de tiempo. El término $\frac{\bar{H}}{H_o}$ es conocido como el índice de claridad K_t .

Otro modelo, se presentó en 1966 por Swartman y Ogulande, los cuales introdujeron la humedad relativa (R) en tres diferentes ecuaciones:

$$H = 490 D^{0.357} R^{0.262}$$

$$H = 460 e^{0.607 (D-R)}$$

$$H = 464 - 265 D - 248 R$$

donde D era el número de horas de insolación dividido entre 12.

Masson (1966) encontró una relación entre la radiación solar sobre una superficie horizontal (en langley¹⁴ por día) y el número de horas de insolación (n). El resultado fue expresado como:

$$H = 60 + (1406.2 n^2 + 7426.6 n^2)^{1/2}$$

Reddy (1971) sugiere el uso del número de días lluviosos, latitud, humedad relativa y ubicación del lugar respecto al mar, además de la heliofanía¹⁵ relativa, para calcular la irradiación¹⁶ global diaria

¹⁴ El langley (Ly) es una unidad utilizada para medir la radiación solar, $1 Ly = \frac{\text{calor } \mu\text{a}}{\text{cm}^2}$.

¹⁵ Representa la duración de horas de sol.

promedio mensual con la siguiente fórmula:

$$H = 0.0418 K \left[1 + 0.8 \frac{\bar{n}}{N} \right] \frac{(1 - 0.2 J)}{0.1 h_r^{0.5}}$$

donde:

$$K = (\lambda N + \psi_{ij} \cos \phi) 10^2 \text{ [cal/cm}^2 \text{ /d}\bar{a}\text{]}$$

ϕ = Latitud del lugar en grados

$$J = \frac{\text{días lluviosos del mes}}{\text{días del mes}}$$

h_r = Humedad relativa promedio mensual

ψ_{ij} = Factor estacional

i = 1- Estaciones continentales, 2- Estaciones costeras, 3- Estaciones en montaña

j = Se refiere al mes (1, 2, 3. . . 12)

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1} (-\tan \phi \tan \delta) = \text{Longitud del día}$$

δ = Declinación

b. Radiación solar difusa sobre superficies horizontales

Los estudios de los datos de radiación solar disponible han mostrado que el promedio de la fracción H/H_d (H_d , la radiación difusa) es una función de K_t . La Figura III.9 muestra las gráficas con la correlación original de Liu y Jordan (1960), Choudhury (1963), Stanhill (1966), Ruth y Chant (1976), Tuller (1976) y Collares-Pereira y Rabl. Se presentan diferencias, probablemente debido en parte a las dificultades instrumentales y en parte a efectos estacionales.

Page también propuso una correlación y, a pesar de su sencillez, ha sido validada con datos de localidades de diversas regiones del mundo y con condiciones climatológicas, siendo la correlación la siguiente:

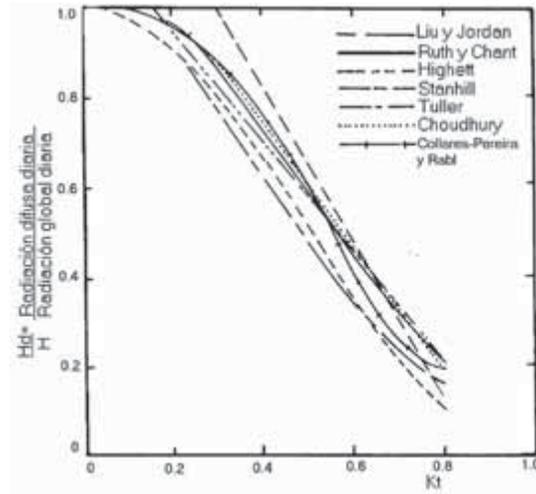
$$H_d = H \left[1.0 - 1.13 \frac{H}{H_o} \right]$$

¹⁶ Es la densidad de potencia incidente en una superficie.

donde la irradiación solar extraterrestre global diaria promedio mensual en una superficie horizontal se calcula con la siguiente fórmula:

$$H_o = \frac{(24 \times 3600 G_{cs})}{\pi} E_o \left[\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta \right]$$

Figura III.9 Comparación de diferentes modelos de radiación difusa



Fuente: MME, 2005

El factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre se calcula con la ecuación desarrollada por Spencer:

$$E_o = 1.00011 + 0.00128 \sin \Gamma + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.00077 \sin \Gamma$$

El ángulo horario al alba o al ocaso ω_s , se calcula con:

$$\omega_s = \cos^{-1} (\tan \phi \tan \delta)$$

c. Radiación solar directa sobre superficies horizontales

Sharma y Pal (1965) propusieron la siguiente fórmula para el cálculo de la radiación directa sobre una superficie horizontal:

$$\frac{H_b}{H} = \left[\frac{CN}{CN + K} \right] \left[\frac{A \operatorname{sen}^2 \beta}{\operatorname{sen}^2 \beta + c} \right]$$

donde K y A son constantes que varían ligeramente con la latitud solar, y CN varía según el tipo de día.

Numan en 1975 propuso una relación entre la radiación global y la radiación directa:

$$H_b = 1.6163 H - 798.45 \operatorname{sen} \beta$$

También se puede obtener la irradiación directa horizontal promedio mensual de forma sencilla, si se cuenta con la irradiación global y la irradiación difusa:

$$H_b = H - H_d$$

3.1.2.4. Sistema de Mapeo

El primer paso consiste en la preparación de los archivos de entrada requeridos por el programa de cómputo para el proceso de interpolación. Cada archivo contiene el nombre y las coordenadas geográficas de cada localidad, así como los datos de irradiación promedio mensual obtenidos como resultado de la aplicación de los modelos descritos anteriormente. El segundo paso consiste en el proceso de interpolación mediante algún método, el método de kriging es el más utilizado para este fin. Por último se procede a la impresión de estos archivos en forma de mapas, y para lograr una mejor ubicación geográfica se debe agregar un mapa digitalizado del contorno de la zona geográfica en estudio (II, 2005).

a. Método geoestadístico de interpolación de kriging

Kriging es un método geoestadístico sofisticado que se basa en la premisa de que la variación espacial del fenómeno representado por los valores Z^{17} de la serie es estadísticamente homogénea a lo largo de la superficie. Calcula los pesos que se darán a cada punto de referencia usados en la valoración. Su formulación matemática aplica un algoritmo de mínimos cuadrados utilizando

¹⁷ Puntos en los cuales se tiene información de determinada propiedad de la superficie a estudiar.

variogramas¹⁸ como funciones de ponderación. Es muy útil por su carácter predictivo cuando se dispone de pocos datos de muestreo.

3.2. Recursos eólicos en México

El conocimiento del recurso energético eólico en México está a nivel exploratorio y de reconocimiento, sin embargo, las mediciones puntuales o de pequeñas redes anemométricas, realizadas principalmente por el IIE y algunas otras entidades o empresas, han servido para confirmar a nivel de prefactibilidad. Los estudios realizados hasta ahora sugieren que México posee un potencial importante cuyo aprovechamiento podría satisfacer, por lo menos, 4.5 % de las necesidades de electricidad esperadas para el año 2010¹⁹.

3.2.1. Regiones con recursos eólicos²⁰

La existencia de vientos técnicamente aprovechables y económicamente viables se encuentran en las siguientes regiones:

Sur del Istmo de Tehuantepec

Esta región contiene un área del orden de 1000 km² expuesta a vientos muy intensos, dado un fenómeno monzónico entre el Golfo de México y el Golfo de Tehuantepec, donde aflora una corriente marina anormalmente caliente, originando un gradiente térmico y de presión que da lugar a un intenso viento del norte desde el otoño hasta la primavera.

Península de Baja California

En esta área geográfica, se forma una barrera natural perpendicular a los vientos occidentales, que en sus montañas e innumerables pasos puede proporcionar muchos sitios con potencial explotable. El poblado de la Rumorosa y zonas aledañas, así como el paso entre la Sierra de Juárez y la Sierra de San Pedro Mártir, por donde cruza la carretera y la línea eléctrica de Ensenada a San Felipe en el

¹⁸ Herramienta que permite analizar el comportamiento espacial de una variable sobre un área definida, obteniendo como resultado la influencia de los datos a diferentes distancias.

¹⁹ Considerando una tasa de crecimiento promedio de 5% para la demanda de electricidad y 5,000 MW eoloelectricos operando a un factor de planta promedio 25% (IIE y UNAM, 1998).

²⁰ Información tomada principalmente de la página electrónica de la CONUEE.

Golfo de California, son regiones identificadas con alto potencial eólico, que son indicativas de lo que puede encontrarse en muchos otros lugares de la península.

Península de Yucatán

La franca exposición de la península a los vientos alisios de primavera y verano, incrementados en su costa oriental por la brisa marina, y a los nortes en el invierno, hacen de Cabo Catoche, la costa de Quintana Roo y el oriente de Cozumel, zonas con potencial eólico interesante, para contribuir significativamente a los requerimientos de la península en apoyo de su generación termoeléctrica.

Altiplano norte

El norte del país, desde la región central de Zacatecas hasta la frontera con los Estados Unidos, se ve influenciado por la corriente de chorro de octubre a marzo, intensa y persistente, que como viento del poniente al impactar la Sierra Madre Occidental da lugar a innumerables sitios con potencial explotable. En la parte norte del estado de Coahuila existen áreas sumamente ventosas.

Región Central

En la región central del altiplano, prevalecen los vientos alisios de verano, desde Tlaxcala a Guanajuato, siendo Pachuca el estado más conocido por esta característica. Estos vientos complementan estacionalmente, a los del altiplano norte y los del sur del Istmo de Tehuantepec. La complejidad orográfica de esta región, da lugar a la existencia de innumerables pasos y mesetas donde el viento sea energéticamente aprovechable.

Las costas del país

El extenso litoral mexicano y sus islas, presenta por lo menos condiciones para generación eléctrica en pequeña escala y almacenamiento en baterías, sistemas híbridos diesel-eólicos y en otros generación interconectada.

La Figura III.10 muestra las regiones con mayores recursos eólicos.

Figura III.10 Regiones principales con recursos eólicos



Fuente: IEE, 2005

3.2.2. Evaluación de los recursos eólicos

Como ya fue mencionado, México tiene un potencial importante en esta materia. Actualmente se están llevando a cabo un número mayor de estudios para evaluar el recurso eólico que el país posee, sin embargo todavía nos encontramos a un nivel exploratorio.

Con los estudios hechos hasta la fecha tenemos que la región del sur del Istmo de Tehuantepec podría asimilar una capacidad instalada del orden de los 2000 a 3000 MW, con un factor de planta medio de 0.45. En las zonas más propicias, con factores de planta del 0.6 anual y de 0.9 o más en el otoño e invierno. Esto, si se toma en cuenta la infraestructura hasta el día de hoy, pero podría aumentar hasta 12,000 MW con la infraestructura adecuada. (*Borja, 2005*)

Debido a esto, la región cuenta con una evaluación más detallada, por lo que en esta sección nos enfocaremos exclusivamente a esta zona.

3.2.2.1. Corredor Eólico del Istmo de Tehuantepec

El estudio del viento en el Corredor Eólico del Istmo de Tehuantepec, comenzó a mediados de la década de 1970 con dos estaciones anemográficas en la zona. En una de ellas se registraron vientos superiores a 30 km/h por más de 3,500 horas en un año y más de 2,000 horas con vientos superiores a 40 km/h. Con éstos se delimitó así la zona eólica llamada La Ventosa. Estudios hechos más tarde, consideraron que el área del recurso eólico aprovechable podría abarcar toda la superficie que ocupa la llanura costera con una extensión cercana a 3,000 km² (Borja, 2005).

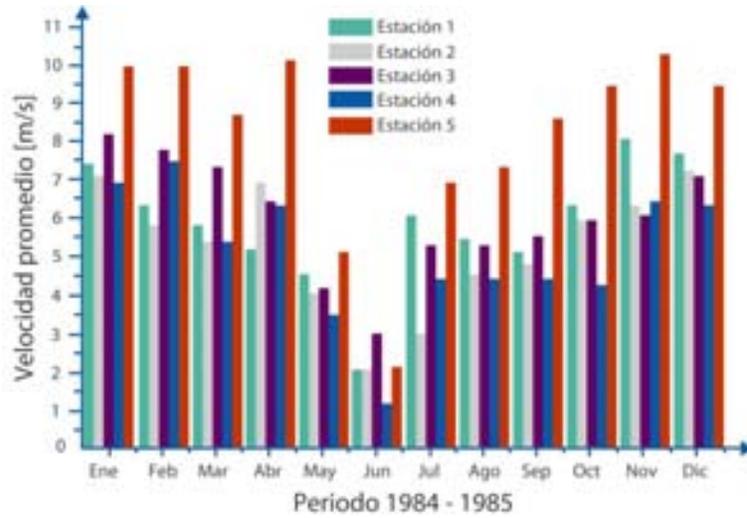
En la evaluación preliminar del recurso eólico en la zona de la Ventosa, se buscó cuantificar espacial y temporalmente el viento para ubicar sitios de aprovechamiento con base en la viabilidad técnico – económico de posibles desarrollos. Para ello se obtuvo:

- Velocidad media del viento, desviación estándar y distribución de la velocidad del viento.
- Potencia media por unidad de área o densidad de potencia media, expresada en W/m², a 10 metros de altura sobre el nivel del terreno en periodos mensuales, estacionales y anuales.
- Energía por unidad de área o densidad de energía (kWh/m²), a 10 metros de altura sobre el nivel del terreno en periodos mensuales, estacionales y anuales.
- Patrones de distribución de velocidades de manera diaria, frecuencia por rumbos y ocurrencia de clammas mensuales.

También se instalaron cinco estaciones anemométricas y una estación climatológica. La Figura III.11 presenta los datos de la velocidad media mensual que se obtuvieron de las estaciones mencionadas.

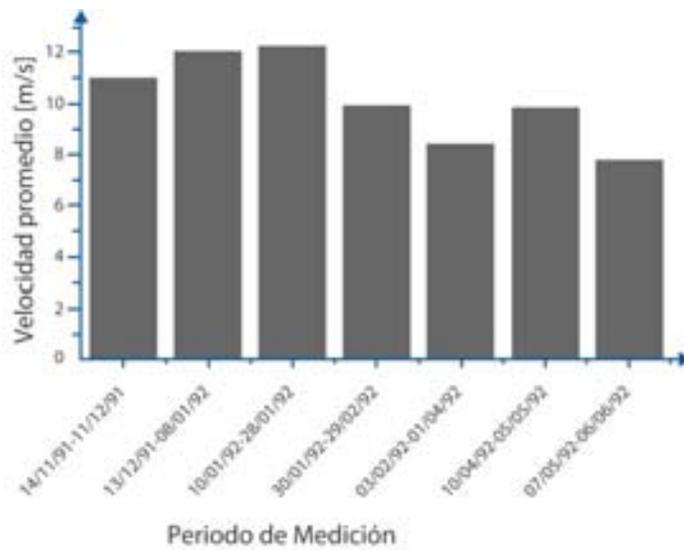
En 1991 se inició un análisis preliminar del viento en los poblados: La Mata, Santo Domingo y Rancho Salinas, instalándose tres equipos anemométricos en estos sitios. La Figura III.12, III.13 y III.14 muestran los principales resultados obtenidos durante el periodo del 14 de noviembre de 1991 al 6 de junio de 1992. Para el caso de La Mata, se observó que este sitio presenta velocidades de vientos intensas con dirección predominante Norte y Noreste.

Figura III.11 Regiones principales con recursos eólicos



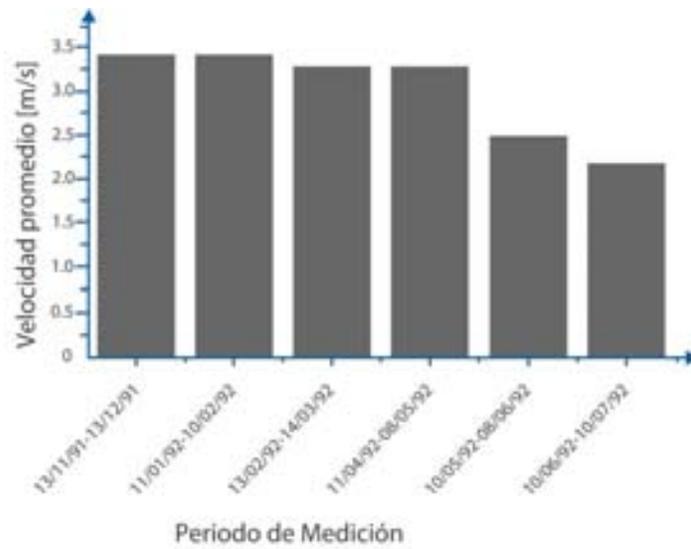
Fuente: Borja, 2005

Figura III.12 Resultados obtenidos en La Mata, Oaxaca



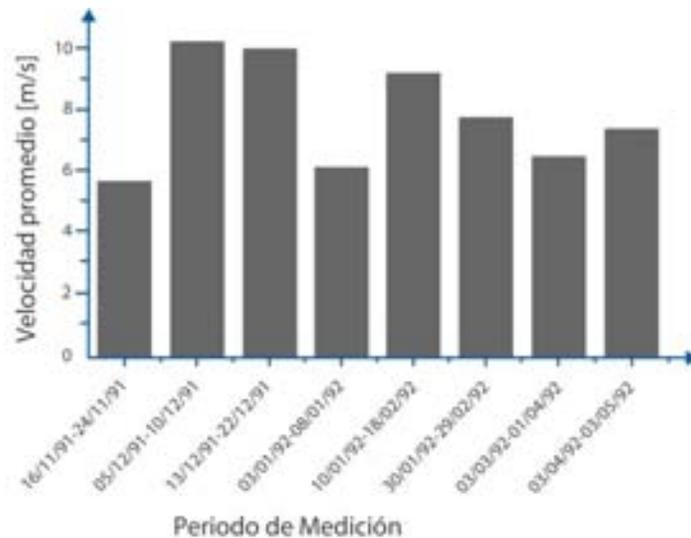
Fuente: Borja, 2005

Figura III.13 Resultados obtenidos en Rancho Salinas, Oaxaca



Fuente: Borja, 2005

Figura III.14 Resultados obtenidos en Santo Domingo, Oaxaca



Fuente: Borja, 2005

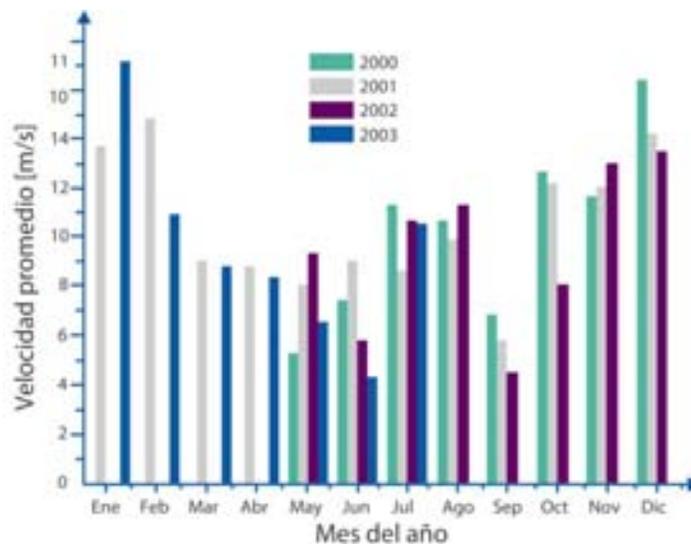
En 1996 se llevó a cabo el *Estudio de Prefactibilidad para un Proyecto de Energía Eólica de 150 MW en La Ventosa, Oaxaca, México*, donde los parámetros base que se utilizaron para definir el

recurso eólico fueron: la velocidad media del viento y su respectiva desviación estándar en periodos mensuales, asociados con la distribución de su dirección y sentido.

Al realizar la estimación del potencial de generación de electricidad para una capacidad instalable de 149.6 MW se consideraron tecnologías disponibles en los Estados Unidos y se seleccionaron dos máquinas con potencias nominales de 550 kW y 275 kW con altura de instalación cercana a 40 metros sobre el nivel del terreno. Los resultados de la simulación indicaron factores de planta entre 42 y 47.7% y un potencial de generación de electricidad correspondía con el 77% de la generación eléctrica total (625.2) de 1994 en las centrales eléctricas operadas por las instituciones del sector público en el Estado de Oaxaca y aproximadamente el 50% del total de la energía eléctrica vendida durante el mismo año en todo el Estado.

Desde el segundo semestre del año 2000 a la fecha, se han obtenido datos anemométricos medidos por la estación de monitoreo La Venta. La medición de la velocidad del viento es realizada con anemómetros de copas aplicando el método de distancia recorrida. Los datos instantáneos se obtienen con una frecuencia de 0.5 Hz y se registra su valor promedio para intervalos de 10 minutos. Las mediciones se realizan a dos alturas diferentes, una está a 32 m y la otra es 15 m sobre el nivel del terreno. En la Figura III.15 se observan los resultados de estas mediciones.

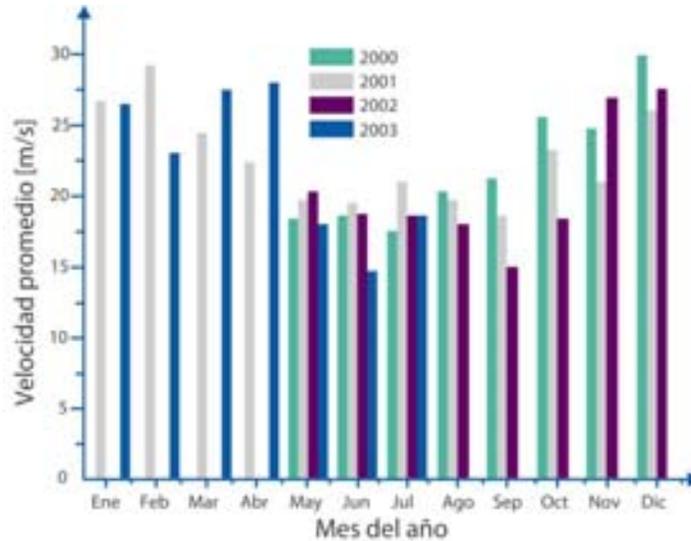
Figura III.15 Velocidad media del viento a 32 m de altura sobre el nivel del terreno



Fuente: Borja, 2005

La Figura III.16 corresponde a las velocidades máximas registradas a 32m de altura. Como se puede observar, en la región se han alcanzado velocidades cercanas a 30 m/s que equivalen a velocidades del orden de 108 km/h.

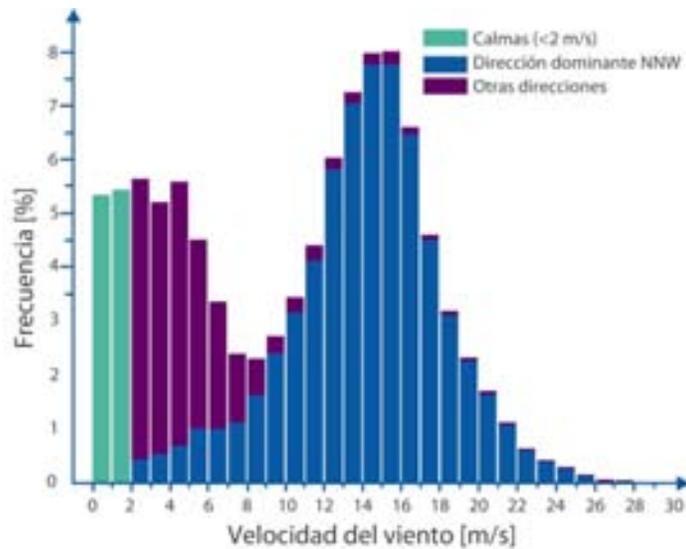
Figura III.16 Velocidad máxima del viento a 32 m de altura sobre el nivel del terreno



Fuente: Borja, 2005

La Figura III.17 se observa que la dirección dominante del viento es la dirección Nornoreste (NNE) con alrededor del 65% durante todo el año. Para la dirección NNE se estimó la velocidad media en 14 m/s. De igual forma se observa que las velocidades menores que 8 m/s típicamente corresponden a otras direcciones o rumbos. Se debe mencionar que se consideró que las velocidades menores que 2 m/s corresponden con calmas debido a la sensibilidad y resolución de los anemómetros utilizados. De esta manera se calculó que el 10% durante todo el año corresponde con periodos de calma.

Figura III.17 Distribución de velocidad por rumbos



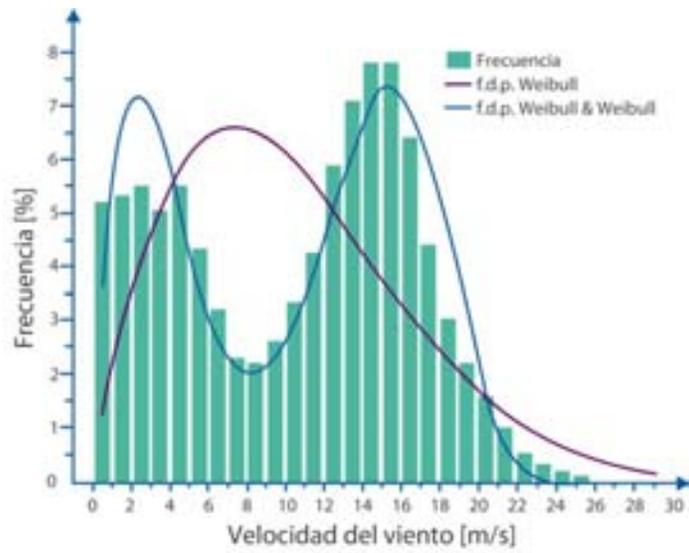
Fuente: Borja, 2005

La gráfica de frecuencias de las velocidades medias correspondientes al año 2001, se muestran en la Figura III.18, en ésta se observa que la función de densidad de probabilidad (f.d.p.) de Weibull no produce el comportamiento de los datos anemométricos. Por tal razón se surgió utilizar una f. d. p. bimodal compuesta por la suma de dos funciones de Weibull, reproduciendo así con mayor exactitud los datos anemométricos.

El cálculo de la densidad de potencia de los datos para el 2001 se presenta en la Figura III.19, observando que la mayor densidad de potencia ocurre en el trimestre de diciembre a febrero.

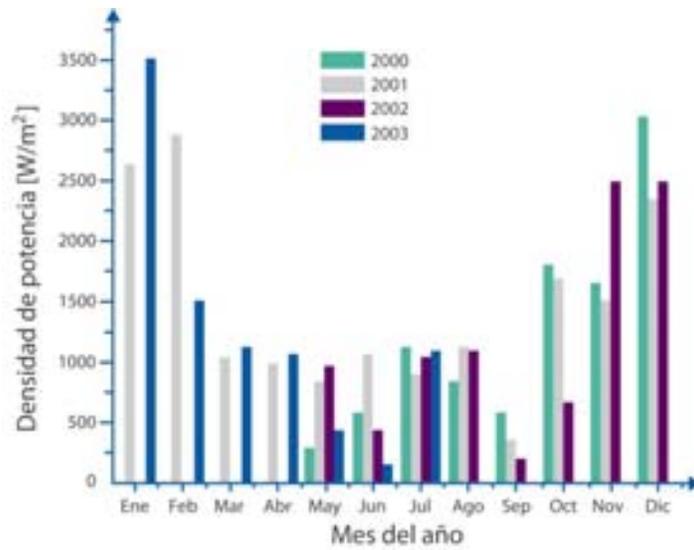
Por último, mencionar que en el Anexo III.3 se presentan mapas del recurso eólico en todo el país.

Figura III.18 Función de densidad de probabilidad



Fuente: Borja, 2005

Figura III.19 Densidad de potencia



Fuente: Borja, 2005

3.3. Recursos solares en México

3.3.1. Regiones con recursos solares

De acuerdo con la CONAE, en general México cuenta con un nivel de medio a alto de radiación solar, existiendo regiones en las que sobre sale por niveles comparables a nivel mundial donde actualmente se aprovechan con éxito los recursos solares. Estas zonas son las siguientes:

Región noroeste

En la región noroeste encontramos un área que tiene un alto nivel de radiación, la cual es la más alta de México. Abarca los estados de Sonora, Chihuahua y la Península de Baja California, donde se recibe la mayor irradiación global durante todo el año.

Región Noreste

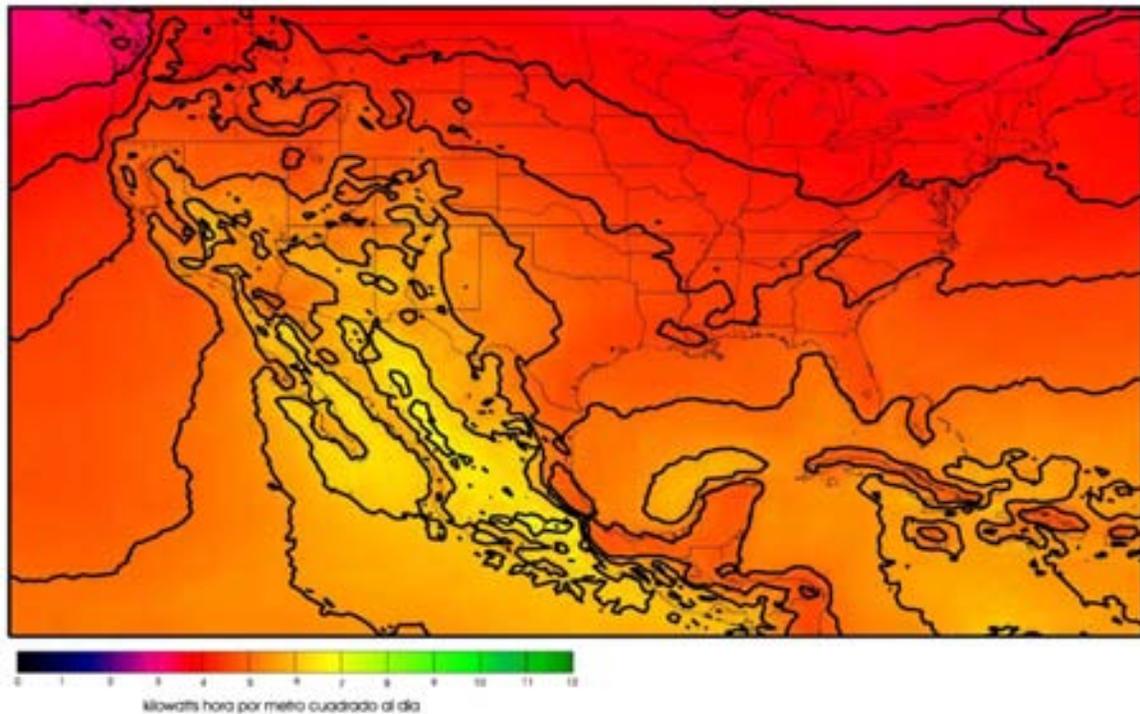
Esta región está conformada por los estados de Durango, Zacatecas y Aguascalientes, los cuales reciben una buena densidad de flujo de radiación de febrero a mayo, situándose en un alto nivel de radiación. En esta zona sería propicia la instalación de sistemas de conversión de energía solar del tipo de concentración.

Región centro-sur

Puebla, Guerrero y Oaxaca, pertenecen a la región del centro – sur del país. En esta zona podemos encontrar un nivel de radiación que va desde el nivel medio hasta poder encontrarse, en ciertas zonas, con un nivel alto de radiación.

La Figura III.20 muestra las principales regiones que cuentan con recursos solares.

Figura III.20 Promedio anual de irradiación global



Fuente: IILSEN, 2004

3.3.2. Evaluación de los recursos solares²¹

En 1975 el Instituto de Ingeniería de la UNAM generó la primera versión de los mapas de irradiación global diaria promedio mensual para México, utilizando datos de insolación de 54 estaciones meteorológicas del Sistema Meteorológico Nacional (SMN). Posteriormente para el año de 2005, mediante la ampliación de la base de datos proporcionada por el SMN, se publicó la actualización de dichos mapas de irradiación, los cuales se llevaron a cabo bajo el modelo de Rafael Almanza, investigador del Instituto de Ingeniería. Este modelo, tiene desviaciones menores del 10 por ciento y fue desarrollado en la India, situación que hizo más confiable su aplicación en México, ya que tanto la latitud, como los climas en ambos países son semejantes. Actualmente este modelo es el más consultado en México para estimar las cantidades totales de radiación diarias sobre superficies horizontales.

²¹ La información que se presenta en esta sección se obtuvo de los resultados publicados del *II, 2005*.

El método de Almanza, utiliza varias correlaciones analíticas donde se calcula, para 57 localidades distribuidas en el territorio nacional, la irradiación global, directa normal, directa horizontal y la difusa horizontal, así como las irradiaciones correspondientes a un plano inclinado con un ángulo igual a la latitud de la localidad, en valores diarios promedio mensual. Los resultados fueron vaciados en mapas para posteriormente trazar isohelias de irradiación aplicando el método geostadístico de interpolación conocido como kriging que ha resultado ser el más apropiado para el manejo de datos de radiación solar.

Los modelos que se utilizaron para calcular la irradiación global, los componentes directo y difuso son:

Irradiación global

Como se describió en la primera parte del capítulo, existen varios modelos empíricos que por lo general requieren de los mismos parámetros. Los parámetros meteorológicos que normalmente se utilizan son la humedad relativa, la temperatura, la altitud, la nubosidad, así como la heliofanía relativa.

En un análisis comparativo de algunos modelos empíricos con datos medidos en la ciudad de México por el grupo de radiación solar del Instituto de Geofísica, UNAM, se encontró que el modelo de Reddy (1971) proporcionó mejores resultados que otros modelos utilizados para México. El modelo sugiere el uso del número de días lluviosos, latitud, humedad relativa y ubicación del lugar respecto al mar, además de la heliofanía relativa, para calcular la irradiación global diaria promedio mensual.

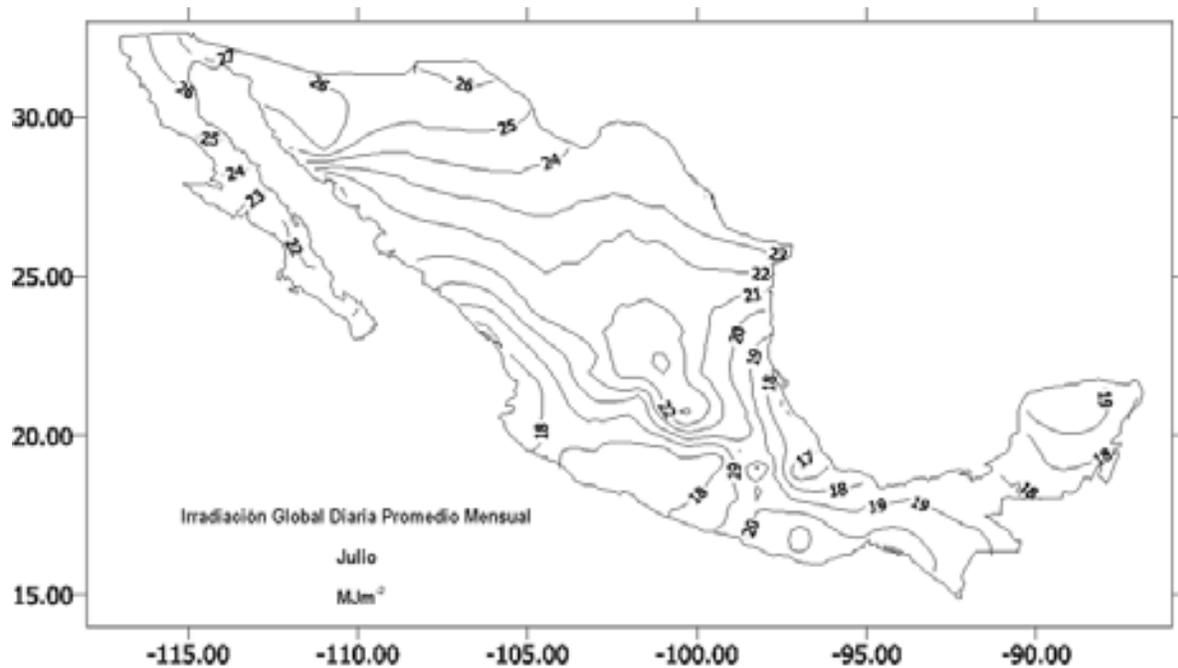
Irradiación difusa y directa

La correlación originalmente propuesta por Liu y Jordan, fue el punto de partida de varios autores que han desarrollado sus propias correlaciones entre la irradiación difusa y la irradiación global. Una correlación que ha sido validada con datos de localidades de diversas regiones del mundo y con condiciones climatológicas variadas, es la correlación de Page, misma que se utilizó para el desarrollo de este método.

Para el cálculo de la irradiación directa horizontal promedio mensual, sólo se hizo la diferencia entre la irradiación global y la irradiación difusa.

El primer resultado fue la elaboración de los mapas de isohelias de radiación, los cuales muestran la cantidad de energía incidente en un metro cuadrado por día. La radiación solar se presenta en megajoules por metro cuadrado, MJ/m². Esta unidad es un indicador de densidad de energía. En los mapas se representa la cantidad total de energía para un día, desde el amanecer hasta el atardecer., teniendo así un valor diario promedio para un mes en particular. En la Figura III.21 podemos observar un ejemplo de un mapa de isohelias.

Figura III.21 Irradiación global diaria promedio mensual (MJm⁻²), en julio



Fuente: Instituto de Ingeniería, 2005

A partir de la elaboración de los mapas de isohelias, fue más claro identificar las regiones con mayores recursos solares. A continuación se presentan los resultados de acuerdo al tipo de irradiación.

Irradiación global diaria promedio mensual en una superficie horizontal

La región noroeste (Sonora y Chihuahua), recibe la mayor irradiación global durante todo el año, con un mínimo de 13/14 MJm⁻² en diciembre y enero, y un máximo de más de 30 MJm⁻² en mayo y junio. Una zona también definida como de buena radiación se puede apreciar en la región sureste de Oaxaca con radiaciones entre 18 y 22 MJm⁻² para todo el año. La región oriente, que abarca los estados de Veracruz y Tamaulipas es la zona con menor radiación.

Irradiación directa normal diaria promedio mensual

Todo el año la región noroeste del país es la que mayor radiación recibe, con un mínimo de aproximadamente 20 MJm⁻² de diciembre a enero y cerca de 30 MJm⁻² en los meses sin lluvia. El sureste de Oaxaca recibe energía radiante de más de 20 MJm⁻² durante el periodo de octubre a abril, con un máximo de 28 MJm⁻² en febrero. Durango y Zacatecas, también reciben una buena densidad de flujo de radiación de febrero a mayo, de entre 28 y 30 MJm⁻².

Irradiación directa diaria promedio mensual en una superficie horizontal

Durante junio a octubre existe una cierta tendencia latitudinal en la densidad de flujo de la radiación solar directa, con valores de 10 MJm⁻² en la región centro-sur del país, que se incrementan hacia el norte con valores de hasta 28 MJm⁻². A partir de octubre esta tendencia parece revertirse y se puede apreciar una variación de Oeste a Este durante noviembre a mayo, con mayores irradiaciones en la región central del país, con valores de hasta 22 MJm⁻² en algunas zonas, mientras que en ambas regiones costeras los valores no son más altos de 14 MJm⁻² y siempre con mínimos en la costa oriental de hasta 6 MJm⁻².

Irradiación difusa diaria promedio mensual en una superficie horizontal

Prácticamente durante todo el año, se puede apreciar poca variación en los valores de radiación difusa en la región sur-sureste del país, con mínimo de 6 MJm⁻² y máximo de 8 MJm⁻². En cambio, en la región noroeste del país aparecen valores mínimos de hasta 3 MJm⁻² y éstos se van incrementando hacia el noreste-este, donde aparecen máximos de hasta 9 MJm⁻² en la parte norte del

estado de Tamaulipas.

Irradiación global diaria promedio mensual en una superficie inclinada

Las zonas de mayor irradiación se encuentran en el sureste de Oaxaca y en la parte noroeste de los estados de Chihuahua y Sonora, aunque para todo el año es mayor en esta última zona. Se presenta también una zona determinada por los estados de Durango y Zacatecas con una irradiación de 20 MJm⁻² durante todo el año, siendo de 18 MJm⁻² sólo en diciembre y un máximo de 24 MJm⁻² en febrero y marzo. La región este del país, parte del estado de Veracruz, permanece prácticamente constante con 16 MJm⁻² durante todo el año. La península de Yucatán tiene también poca variación en el año con 18 MJm⁻². Al compararse con la irradiación global sobre una superficie horizontal, se puede apreciar que el mayor beneficio se obtiene en la región norte del país, con incrementos cercanos al 35% en los meses de invierno y el resto del año con 10 a 15 % de incremento. En las regiones centro-sur el incremento es de 10 a 15 %.

Irradiación directa diaria promedio mensual en una superficie inclinada

El flujo es mayor para este caso que para la irradiación directa horizontal, observándose un máximo en diciembre cercano al 30 % en la parte sur del país y cercano al 60 % en la región noroeste.

Irradiación difusa diaria promedio mensual en una superficie inclinada

Se tiene una fuerte tendencia latitudinal con este tipo de irradiación, que es mayor en la región sur-sureste del país; sin embargo, en julio y agosto hay una distribución uniforme en todo el país de 7 a 8 MJm⁻². La región noreste presenta también valores altos con respecto al noroeste de México y similares a los del sur-sureste durante la mayor parte del año.

El Resultado final fue, poder identificar las regiones de mayor radiación en México y por lo tanto los recursos solares con los que se cuenta actualmente, y así poder tener disponible la información necesaria para futuros proyectos. El Anexo III.4 muestra los mapas de isohelias de irradiación global diario promedio mensual, correspondientes a los doce meses del año. También en el Anexo III.5 se incluye la Tabla de irradiación global media para diferentes localidades del país.

Con el trabajo realizado se pudo concluir, que las regiones con mayor radiación son las de Sonora, Chihuahua y el oriente de la península de Baja California. Puede considerarse que estas zonas son las más apropiadas para la instalación de sistemas que requieren de una alta incidencia de radiación solar. Existen otras dos regiones bien definidas con más de 19 MJm^{-2} en el año: una que abarca Durango, Zacatecas y Aguascalientes, y la otra, la mayor parte de Puebla, Guerrero y Oaxaca.

Conclusiones

En el presente Capítulo se revisaron las metodologías generales para la evaluación de los recursos eólicos y solares, lo que sirvió para poder comprender cómo se lleva a cabo la evaluación de dichos recursos energético, y se llegaron a las siguientes conclusiones:

- México tiene por lo menos cinco regiones que cuentan con un recurso eólico aprovechable, estas regiones son: la Península de Baja California, la Península de Yucatán, el altiplano Norte, la región centro y costas del país. El recurso se cuantifica en un potencial de 40,000 MW (*SENER, 2006*).
- El estado de Oaxaca cuenta con un gran potencial eólico, considerado como el mejor en el mundo. Según los estudios del NREL y otras instituciones, la capacidad que podría llegar a instalarse es del orden de 15,000 MW, con una producción estimada anual de energía eléctrica de 60,000 GWh.
- Las regiones con mayor radiación solar son las de Sonora, Chihuahua y el oriente de la península de Baja California. Puede considerarse que estas zonas son las más apropiadas para la instalación de sistemas que requieren de una alta incidencia de radiación solar. Existen otras dos regiones bien definidas con más de 19 MJm^{-2} en el año: una que abarca Durango, Zacatecas y Aguascalientes, y la otra, la mayor parte de Puebla, Guerrero y Oaxaca.
- Los índices del recurso solar van de los $4.4 \text{ kWh}_e/\text{m}^2$ por día en la zona centro, a los $6.3 \text{ kWh}_e/\text{m}^2$ por día en el norte del país (*SENER, 2006*).

En general, México es considerado a nivel mundial como uno de los países con mayor potencial de recursos, tanto eólicos, como solares. Teniendo en cuenta esta información, en el siguiente capítulo estudiaremos la evolución histórica y situación actual de la utilización de energías eólica y solar para generar energía eléctrica en México.

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

Capítulo 4

Evolución histórica y situación actual de la utilización de energías eólica y solar para generar energía eléctrica en México

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

4. Evolución histórica y situación actual de la utilización de energías eólica y solar para generar energía eléctrica en México

Introducción

Para poder comprender la situación actual en México, en materia energética, específicamente en el uso de energía eólica y solar, primero debemos estudiar su evolución histórica. Es por eso que este capítulo presenta, cuatro apartados que engloban aspectos importantes para comprender la evolución de la utilización de las energías renovables, para la generación de electricidad en México.

En el primero de ellos, se estudia el marco regulatorio, donde encontraremos los principales instrumentos que regulan al sector energético. En éste se destaca la normatividad que ha apoyado y apoyará el desarrollo del uso de tecnologías con energéticos alternativos.

En el segundo apartado, se dan a conocer algunos incentivos que se han implementado para la promoción de uso de energías renovables, a través de programas y proyectos. Esto con el fin de tener la perspectiva de la gama de alternativas que se están generando en el país.

Teniendo un panorama general del desarrollo en materia legal, se presenta la situación actual en el país, mostrando los logros en el aspecto de la capacidad instalada al paso del tiempo, para así poder hacer una comparación entre la evolución de ésta y la del marco regulatorio. Con esto se busca lograr entender la forma en la que el marco legal influye en la evolución del sector energético en materia de renovables.

Por último, se verán los principales proyectos que ya se encuentran en desarrollo para el próximo periodo de diez años, logrando así tener un escenario completo para poder estudiar la diversificación con energías renovables para la generación de energía eléctrica en México, misma que se analizará en el próximo capítulo.

4.1. Políticas públicas y marco regulatorio

4.1.1. Evolución histórica

En sus orígenes, el sector eléctrico de México estuvo formado por empresas privadas conformadas en su mayor parte por capital mexicano y, posteriormente por un número importante de empresas con capital extranjero, cuya operación estaba regulada por concesiones.

En 1937 se creó la Comisión Federal de Electricidad (CFE), bajo el gobierno del presidente Lázaro Cárdenas, marcando el inicio de una tendencia a establecer la presencia directa del Estado en una actividad que hasta entonces se encontraba a cargo de particulares. La CFE se creó con el objetivo de organizar y dirigir un sistema nacional de generación, transmisión y distribución de energía y adecuarlo a las necesidades del desarrollo económico del país. Un año después, en 1938, se promulgó la ahora extinta Ley de la Industria Eléctrica que regulaba lo relacionado a las concesiones y los permisos en materia de electricidad.

Esta tendencia culminó en 1960, iniciándose el proceso de nacionalización a través de la adquisición de las propiedades de la empresa American and Foreign Power y la compra del 90% de las acciones de la Mexican Light and Power Co. Con la nacionalización del sector eléctrico, se estableció constitucionalmente el derecho exclusivo del Estado para generar, conducir, transformar, distribuir y abastecer la energía eléctrica para la prestación del servicio público, planteamientos constitucionales que se encuentran en los artículos 25, 27 y 28 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

Hasta 1975, los preceptos señalados fueron seguidos por parte del Estado. Sin embargo, en la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE) que actualmente se encuentra en vigor y que fue emitida ese año, se estableció por primera vez que el autoabastecimiento de energía eléctrica para satisfacer la demanda de algunos usuarios no era considerado como servicio público. Con esto se hizo posible la participación de la inversión privada en la generación de energía eléctrica, sujeta a un permiso previo y a condición de que fuera posible o inconveniente para la CFE proporcionar el suministro.

En 1983, se reformó la Ley para ampliar los supuestos del autoabastecimiento, a fin de permitir la cogeneración y generación de energía destinada exclusivamente a emergencias derivadas de interrupciones en el servicio de la energía eléctrica.

En 1992 se efectuaron nuevas reformas a la Ley para permitir la inversión privada en la generación de energía eléctrica para su venta exclusiva a la CFE. Esto abrió la posibilidad de que los particulares generen electricidad bajo la modalidad de productores independientes de energía. Con estas reformas, además:

- Se perfeccionaron las figuras de autoabastecimiento, cogeneración, pequeña producción y producción independiente como formas de generación que no constituyen servicio público.
- Se amplió el concepto de autoabastecimiento, para incluir a sociedades que tengan por objeto la generación de energía eléctrica para la satisfacción de los requerimientos de sus socios.
- En la modalidad de producción independiente se permite generar energía eléctrica para su venta a CFE. La CFE se obliga a adquirir la electricidad mediante un contrato específico.
- La modalidad de pequeño producción es similar a la producción independiente, con la salvedad que la capacidad está limitada a 30 MW. La producción de electricidad debe venderse exclusivamente a CFE.

Aunque el monopolio se conserva para la prestación del servicio público, la LSPEE actualmente permite la participación de particulares en la generación e importación de energía eléctrica. Estas reformas fueron un primer paso para propiciar la inversión privada en generación de energía eléctrica.

Un año más tarde, con el decreto de creación en 1993, se forma la Comisión Reguladora de Energía (CRE), como un órgano consultivo en materia de electricidad con el fin de promover el desarrollo de los sectores del gas y la energía eléctrica en beneficio de los usuarios.

Para 1995, se expidió La Ley de la Comisión Reguladora de Energía trayendo consigo una transformación para esta Comisión. Con esta Ley la Comisión deja de ser un órgano consultivo para pasar a uno desconcentrado de la Secretaría de Energía, con autonomía técnica y operativa, encargado de la regulación de gas natural y energía eléctrica en México. La Ley fortaleció el marco institucional, dio operatividad a los cambios legales, y claridad, transparencia y estabilidad al marco

regulador de la industria eléctrica y de gas natural. Asimismo, amplió la autoridad de la CRE en materia de gas natural y energía eléctrica, y concentró en ella atribuciones que se encontraban dispersas en otros ordenamientos, dependencias y entidades.

Para finales del año 2000, se publica el Programa Sectorial de Energía 2001 – 2006 (PSE) donde se establece que para el 2006 se habrá incorporado por lo menos 1,000 MW adicionales a la capacidad instalada de generación de electricidad, a partir de fuentes renovables de energía (excluyendo a las grandes hidroeléctricas programadas por CFE). Resaltando, que para ello se requerirá de una mayor aportación del sector privado y del apoyo de la CFE, además de hacer uso de los diferentes mecanismos de financiamiento, tales como los desarrollados por el Gobierno Federal conjuntamente con el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF), el Banco Mundial (BM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

En el año 2001, se plantea una propuesta de ley para energías renovables la llamada Ley para el Aprovechamiento de las Fuentes Renovables de Energía (LAFRE). Esta propuesta busca dar certidumbre jurídica al aprovechamiento de las energías renovables en la generación de electricidad, establecer las reglas en cuanto a su uso y reconocer sus beneficios, con el propósito de apoyar la generación de electricidad producida por las empresas paraestatales y privadas, en el caso de la generación a pequeña escala y en comunidades aisladas.

En diciembre del 2005 se aprobó en la Cámara de Diputados la iniciativa de dicha Ley, en la que se establece la creación de un Programa para el Aprovechamiento de las Fuentes Renovables de Energía. En este Programa se define 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%, sin incluir las grandes hidroeléctricas. También se dan otros avances, como es la modificación del modelo de contrato de interconexión para autoabastecimiento con energías renovables intermitentes por la CRE, con la finalidad de incorporar una metodología para estimar y acreditar el aporte de capacidad de estas fuentes al Sistema Eléctrico Nacional, sin embargo no llega a promulgarse

Para el año de 2007, se da a conocer el el Programa Sectorial de Energía 2007-2012, en donde la principal meta era alcanzar un porcentaje de generación de energía eléctrica con energías renovables del 26% para el 2012.

Finalmente, el 28 de octubre de 2008, después de muchas discusiones en torno a la anticonstitucionalidad que algunos senadores le atribuyen, se aprobó la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición. Esta Ley consta de 31 artículos distribuidos en cuatro capítulos, además de doce artículos transitorios. La Ley es publicada en el Diario Oficial de la Federación un mes después, para así entrar en vigor el 29 de noviembre de 2008. Dicho proyecto de ley tiene por objeto, de conformidad con su artículo 1º: “regular el aprovechamiento de fuentes de energía renovables y las tecnologías limpias para generar electricidad con fines distintos a la prestación del servicio público de energía eléctrica, así como establecer la estrategia nacional y los instrumentos para el financiamiento de la transición energética”.

En esa misma publicación, el Congreso decreta: “Se reforman y adicionan los artículos 1; 2, fracciones V, VI y VII; 3, fracciones VII, VIII, IX, X, XI, XIII, XIV, XV y XXI; 4; 6; 7, fracción VIII; 10; 12 y 13; y se deroga la fracción VIII del artículo 2, todos de la Ley de la Comisión Reguladora de Energía, también se dieron a conocer los diversos artículos que se reforman y adicionan a la Ley de la Comisión Reguladora de Energía”. Con esto se logra que la CRE expida modelos de convenios y contratos de adhesión para las actividades reguladas y que vigile el cumplimiento de las disposiciones administrativas aplicables, entre otros aspectos.

4.1.2. Situación actual

El sector eléctrico mexicano dispone actualmente de un marco regulatorio, dentro del cual los actores involucrados pueden tomar decisiones en un entorno favorable. Los principales ordenamientos jurídicos y los instrumentos de regulación mediante los cuales se rigen las operaciones del sector eléctrico, se muestran en la Figura IV.1.

El marco regulatorio del sector eléctrico mexicano tiene como fundamento los Artículos 25, 26, 27 párrafo sexto, 28, 73, 74, 90, 108, 110, 123 y 134 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

Por su parte, los principales ordenamientos legales derivados de la norma fundamental que regulan la prestación del servicio público de energía eléctrica y a la CFE son:

- Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, que es el ordenamiento principal de esta materia, la cual regula propiamente la prestación del servicio público de energía eléctrica así como la organización y funcionamiento de la CFE, constituyéndose en su ley orgánica.
- Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, por cuanto se refiere a la asignación de facultades de las secretarías de Estado particularmente a la Secretaría de Energía y el reconocimiento y ubicación estructural de las entidades paraestatales.
- Ley de la Comisión Reguladora de Energía, que regula las actividades y organización de dicha comisión así como sus facultades.

Figura IV.1 Ordenamientos jurídicos que rigen las actividades del sector eléctrico



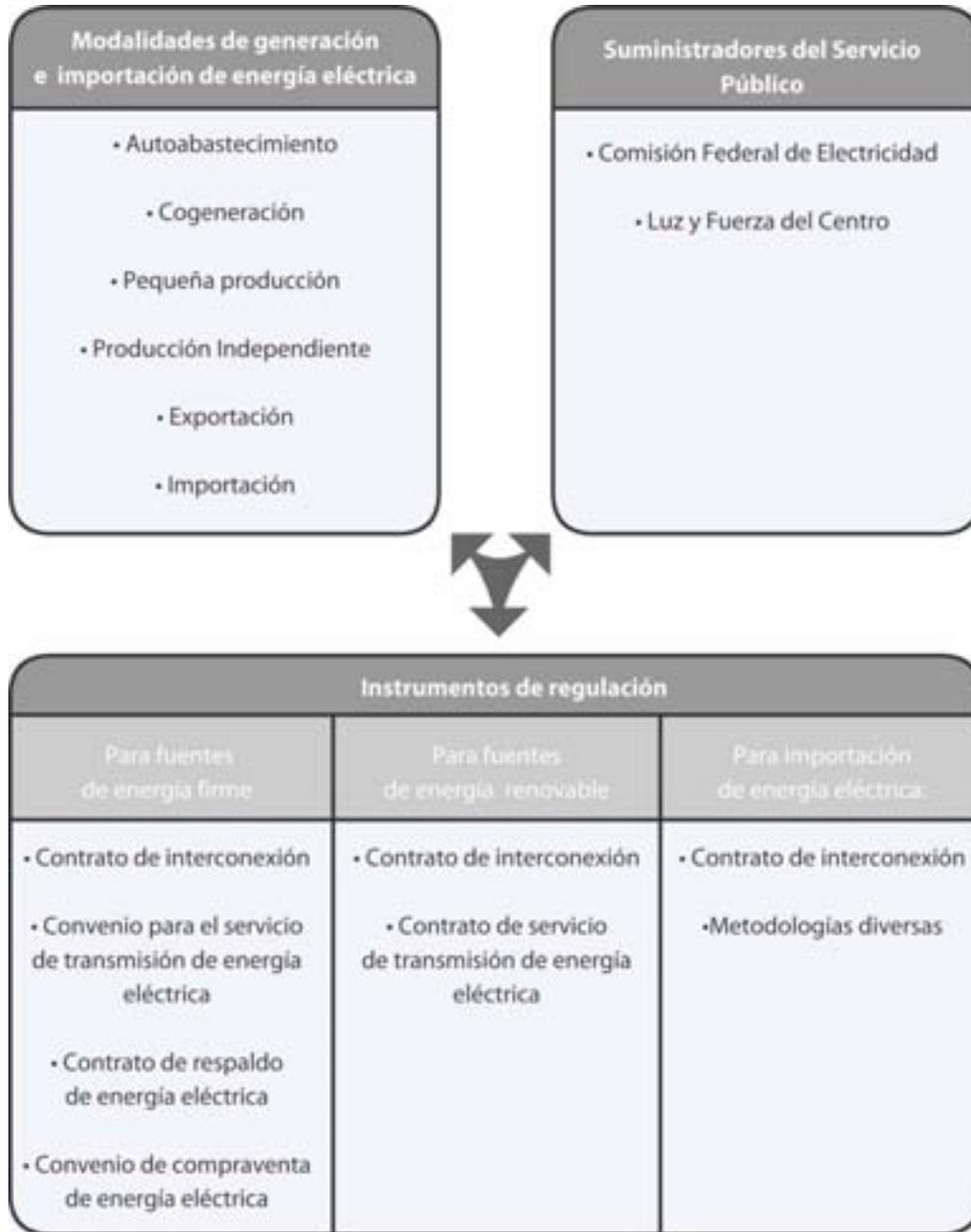
Fuente: SENER, 2007 Adicionalmente a estos ordenamientos, el marco regulatorio cuenta con instrumentos de regulación que establecen los lineamientos y los mecanismos de interrelación entre los particulares y suministradores del servicio público (CFE y LFC). Estos mecanismos se muestran en la Figura IV.2.

Con la expedición de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE) en 1975, se establece que la participación de los particulares en la generación de energía eléctrica puede realizarse, sujeta a previo permiso y la opinión de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Como se mencionó anteriormente, el Congreso de la Unión ha modificado la LSPEE en diferentes ocasiones para incorporar nuevas modalidades de generación de energía eléctrica, tal es el caso de la reforma a dicha ley en 1992, en la cual se incorporaron las modalidades de: cogeneración,

productor independiente, pequeña producción y exportación e importación de energía eléctrica.

Figura IV.2 Modalidades de permisos e instrumentos de regulación



Fuente: SENER, 2007

Desde 1995, a través de la expedición de la Ley de la Comisión Reguladora de Energía, esta entidad cuenta con facultades en materia de regulación de energía eléctrica, entre otras. A partir de ese año, la CRE se constituyó como autoridad reguladora y pasó a ser de un órgano consultivo en materia de

electricidad a un órgano desconcentrado de la Secretaría de Energía con autonomía técnica y operativa con funciones de regulación sobre el sector de electricidad, gas natural y gas LP en México.

El objetivo fundamental de la CRE es promover el desarrollo eficiente de la industria eléctrica, del gas natural y el gas LP mediante una regulación que permita: salvaguardar la prestación de servicios, fomentar una sana competencia, proteger los intereses de los usuarios, propiciar una adecuada cobertura nacional y atender la confiabilidad, estabilidad y seguridad en el suministro y prestación de los servicios.

Los lineamientos y los mecanismos de interrelación entre los particulares y suministradores del servicio público, son considerados en las Leyes expuestas con anterioridad. Primero mencionaremos las modalidades de generación de energía eléctrica del sector privado, que de acuerdo a lo establecido en la LSPEE y su Reglamento, bajo las cuales los particulares pueden invertir en la generación e importación de energía eléctrica, están sujetas al previo otorgamiento de un permiso por la CRE y consisten en lo siguiente:

- Autoabastecimiento. Generación de energía eléctrica para fines de autoconsumo siempre y cuando dicha energía se destine a satisfacer las necesidades de personas físicas o morales y no resulte inconveniente para el país.
- Cogeneración. Producción de energía eléctrica conjuntamente con vapor u otro tipo de energía térmica secundaria, o ambas.
- Producción independiente. Generación de energía eléctrica proveniente de una planta con capacidad mayor de 30 MW, destinada exclusivamente a su venta a la CFE o a la exportación.
- Pequeña producción. Generación de energía eléctrica destinada a:
 - La venta a la CFE de la totalidad de la electricidad generada, en cuyo caso los proyectos no podrán tener una capacidad total mayor de 30 MW en un área determinada.
 - El autoabastecimiento de pequeñas comunidades rurales o áreas aisladas que carezcan del servicio de energía eléctrica, en cuyo caso los proyectos no podrán exceder de 1 MW.
 - La exportación, dentro del límite máximo de 30 MW.
 - Exportación. Generación de energía eléctrica para destinarse a la exportación, a

través de proyectos de cogeneración, producción independiente y pequeña producción, que cumplan las disposiciones legales y reglamentarias aplicables según los casos. Los permisionarios en esta modalidad no pueden enajenar dentro del territorio nacional la energía eléctrica generada, salvo que obtengan permiso de la CRE para realizar dicha actividad en la modalidad de que se trate.

- Importación. Adquisición de energía eléctrica proveniente de plantas generadoras establecidas en el extranjero mediante actos jurídicos celebrados directamente entre el abastecedor de la energía eléctrica y el consumidor de la misma.

Como un mecanismo facilitador para la participación de particulares en la generación de electricidad, el marco regulatorio cuenta con instrumentos de regulación que permiten que los permisionarios puedan solicitar a los suministradores la interconexión al Sistema Eléctrico Nacional (SEN). La factibilidad de poder interconectarse. Los instrumentos de regulación consideran tanto fuentes de energía firme como fuentes de energía renovable, para fines de este trabajo, sólo haremos mención de estas últimas.

En 2001, la CRE aprobó una regulación específica para fuentes renovables de energía con la finalidad de fomentar el desarrollo de proyectos de generación de energía eléctrica. Estos instrumentos consideran las características de este tipo de fuentes de energía, como es la disponibilidad intermitente del energético primario y se incluyen conceptos únicamente aplicables a dichas fuentes, tales como:

- Energía sobrante. Cuando un permisionario entrega a sus centros de consumo una cantidad de energía mayor a la correspondiente de su potencia comprometida de porteo o cuando la demanda de los centros de consumo sea menor a la potencia entregada en el punto de interconexión.
- Energía faltante. Cuando una fuente de energía no satisface la potencia de compromiso de porteo con sus centros de consumo.
- Capacidad aportada al SEN. Se reconoce la capacidad que la fuente de energía renovable aporta en las horas de máxima demanda del SEN.

Para el caso de fuentes de energía renovable, es posible realizar compensaciones de energía faltante con energía sobrante, es decir, si existe energía sobrante neta en un mes, esta se puede utilizar para compensar faltantes de meses posteriores, haciendo un corte anual. De esta forma y dada la

intermitencia de estas fuentes, el contrato considera la flexibilidad de estos intercambios. Asimismo, los cargos por la transmisión de energía eléctrica para fuentes renovables se calculan en función de la energía porteada, es decir, dichos cargos se multiplican por el factor de planta de la fuente de energía.

Los instrumentos para regular lo anterior son los siguientes:

- Contrato de interconexión. Es el mecanismo donde se establecen términos y condiciones para la interconexión necesaria entre el SEN, la fuente de energía renovable y los centros de consumo del permisionario, de manera que dicho contrato sirva de marco para todas las operaciones entre el suministrador y el permisionario.
- Convenio para el servicio de transmisión de energía eléctrica. Permite transportar la energía eléctrica generada desde la fuente de energía renovable hasta donde se localizan sus centros de consumo.

Adicionalmente, el 27 de junio de 2007 se publicó en el Diario Oficial de la Federación el contrato de interconexión para fuente de energía solar en pequeña escala, el cual es aplicable a todos los generadores con fuente de energía solar con capacidad hasta de 30 kW, que se interconectan a la red eléctrica del suministrador en tensiones inferiores a 1 kV y que no requieren hacer uso del sistema del suministrador para portear energía a sus cargas.

4.1.3. Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE)²²

La LSPEE, como se ha estado haciendo mención, establece en el Artículo 1° que: “Corresponde exclusivamente a la Nación, generar, conducir, transformar, distribuir y abastecer energía eléctrica que tenga por objeto la prestación de servicio público, en los términos del Artículo 27 Constitucional. En esta materia no se otorgarán concesiones a los particulares y la Nación aprovechará, a través de la Comisión Federal de Electricidad, los bienes y recursos naturales que se requieran para dichos fines”. Este artículo está contenido en el Capítulo I Disposiciones Generales, en el cual, además de plantear el objeto, antes citado, establece las principales definiciones.

²² Esta sección es tomada principalmente de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, publicada en el DOF el 22 de diciembre de 1975, con la última reforma aplicada DOF 22-12-1993.

En este Capítulo, se hace referencia a cuáles servicios no son del orden público, estos son el autoabastecimiento, la cogeneración y la pequeña producción, así como la generación de electricidad por parte de los productores independientes para su venta a la Comisión Federal de electricidad. Tampoco se considera servicio público la electricidad generada para exportación obtenida por cogeneración, producción independiente y pequeña producción, además de la electricidad importada por personas físicas o morales para usos propios y autoabastecimiento, ni la energía destinada a utilizarse en caso de emergencia (estaciones de emergencia) o interrupción del servicio público de electricidad.

Se menciona además lo correspondiente a la prestación del servicio público de energía eléctrica, la cual comprende: la planeación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), la generación, conducción, transmisión, distribución y venta de electricidad, así como todas las obras relacionadas con la planeación, ejecución, operación y mantenimiento del SEN. También resalta las facultades de la Secretaría de Energía, entre las cuales están los dictámenes y autorizaciones de programas relativos al servicio de energía eléctrica; mientras que a la CFE se le hace responsable de todos los aspectos técnicos relacionados con la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.

El Capítulo II Del organismo encargado de la prestación del servicio público de energía eléctrica, como su nombre lo indica, se describe la manera como se rige la CFE y quienes integran la junta directiva, que es la encargada de aprobar el reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, el ajuste de tarifas de acuerdo con el patrimonio de que disponga la Comisión y verificar que se cumplan sus preceptos legales.

El Capítulo III De la participación y capacitación de los trabajadores, nos establece principalmente al importancia de los trabajadores en CFE, ya que como se enuncia en su Artículo 16º: “Los trabajadores electricistas participarán en la organización y funcionamiento de la Comisión Federal de Electricidad, a fin de elevar la productividad, la conciencia social y profesional de los trabajadores y técnicos, así como para lograr el mejor uso de los recursos humanos, técnicos, materiales y financieros del organismo”. Por esta razón se promueve la constante capacitación y adiestramiento para dicho fin.

Los Capítulo IV y V corresponden a las obras e instalaciones y suministro de energía eléctrica, respectivamente. En estos, cabe resaltar que se hace mención a la otorgación de permisos para las modalidades de generación privada, además de referirse a las obligaciones de los titulares de dichos

permisos.

Los próximos dos Capítulos, VI Sanciones y VII Recurso administrativo, resalta los casos en que el permisionario se hace acreedor a las sanciones correspondientes, además de mencionar que se puede hacer en caso de inconformidad.

Por último, se encuentran los Capítulo VIII y IX. El primero, Competencias, cita en su Artículo 44° lo correspondiente: “la aplicación de la presente Ley y de sus disposiciones reglamentarias es de la competencia del Ejecutivo Federal, por conducto de la Secretaria de Energía y de Hacienda y Crédito Público, en los términos de esta propia Ley”. El segundo, Aprovechamiento para obras de infraestructura eléctrica, responsabiliza a CFE el pago del aprovechamiento al Gobierno Federal por los activos que utiliza para prestar el servicio de energía eléctrica.

4.1.3.1. Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica²³

El objetivo de este reglamento es, como se enuncia en el Artículo 1°,: “reglamentar la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica en lo que se refiere a la prestación de dicho servicio y a las actividades previstas en la propia Ley que no constituyen servicio público”.

La Tabla IV.1, nos muestra un panorama general del contenido de este reglamento.

El reglamento de la LSPEE establece todos los requisitos que se deben cumplir en la adición de capacidad al parque de generación, las cualidades de los proyectos considerados en el documento de Prospectiva. Es importante destacar a los principales actores en el cumplimiento de estas acciones: la Secretaria de Energía como ente regulador y los participantes: La Comisión Federal de Electricidad y los productores particulares de energía en sus distintas modalidades.

²³ Esta sección se basa en el Reglamento De La Ley Del Servicio Público de Energía Eléctrica, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 31 de mayo de 1993, última reforma publicada DOF 24-05-2001.

Tabla IV.1 Contenido general del RLSPEE

Capítulo	Contenido General
I	Disposiciones Generales
II	Obligaciones y Facultades del Suministrador
III	Obras Eléctricas para el Servicio Público
IV	Obras para Alumbrado Público y Urbanización de Fraccionamientos
V	Suministro y la Venta de Energía Eléctrica
VI	Disposiciones Tarifarias
VII	Instalaciones Destinadas al Uso de Energía Eléctrica
VIII	Planeación y Prospectiva del Sector Eléctrico
IX	Actividades que no constituyen Servicio Público
X	Inspección
XI	Sanciones
XII	Recurso Administrativo

Fuente: RLLSPEE

4.1.4. Ley de la Comisión Reguladora de Energía²⁴

En su Artículo 1° se enuncia: “La Comisión Reguladora de Energía, órgano desconcentrado de la Secretaría de Energía, gozará de autonomía técnica, operativa, de gestión y de decisión en los términos de esta Ley”. Este artículo fue uno de los cuales fueron modificados con la nueva reforma del 2008, en donde anteriormente la Comisión sólo tenía autonomía técnica y operativa.

También se hacen cambios en otros artículos relacionados con el gas natural y gas licuado de petróleo, que para este estudio no serán mencionadas. Las otras modificaciones fueron hechas en su organización y funcionamiento.

En general, la Ley determina las actividades del sector público y privado que se encuentran sujetas a regulación. Las actividades reguladas definidas en la Ley de la CRE son las siguientes:

²⁴ La fuente para este apartado es la página electrónica de la CRE, además de reforma de la Ley de la Comisión Reguladora de Energía, publicada en el DOF el 28 de noviembre de 2008.

- El suministro y venta de energía eléctrica a los usuarios del servicio público;
- La generación, exportación e importación de energía que realicen los particulares;
- La adquisición de energía eléctrica para el servicio público;
- Los servicios de conducción, transformación y entrega de energía entre entidades que tienen a su cargo el servicio público, y entre éstas y los particulares;
- Las ventas de primera mano de gas natural y gas licuado de petróleo;
- El transporte y almacenamiento de gas natural que no estén relacionados con la explotación, producción o procesamiento;
- La distribución de gas natural, y
- El transporte y distribución de gas licuado de petróleo mediante ductos.

Los principales instrumentos de regulación que la Ley brinda a la CRE son: otorgar permisos, autorizar precios y tarifas, aprobar términos y condiciones para la prestación de los servicios, expedir disposiciones administrativas de carácter general (directivas), dirimir controversias, requerir información y aplicar sanciones, entre otros.

4.1.5. Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética²⁵

El Capítulo I. Disposiciones Generales, se refiere al objeto y definiciones de la Ley. En este sentido como su nombre lo indica y de conformidad con su Artículo 1º, dicho proyecto de ley tiene por objeto, “regular el aprovechamiento de fuentes de energías renovables y las tecnologías limpias para generar electricidad con fines distintos a la prestación del servicio público de energía eléctrica así como establecer la estrategia nacional y los instrumentos para el financiamiento de la transición energética”.

De esta forma se procura que la generación de electricidad se realice de manera compatible con la realidad social y ambiental de nuestro país, al determinar las modalidades de participación de los sectores público y privado, así como los instrumentos regulatorios y de financiamiento que permitirán el aprovechamiento de las energías renovables. Con ello no sólo se incrementa la corresponsabilidad del sector privado en la materia, sino que otorga certidumbre jurídica para su

²⁵ Esta sección es tomada principalmente de la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, publicada en el DOF el 28 de noviembre de 2008.

participación en dichas actividades.

El Capítulo II. De la autoridad, se refiere a las autoridades de la Administración Pública Federal encargadas de aplicar la Ley propuesta.

En primer término, se faculta a la Secretaria de Energía para crear y coordinar los instrumentos más importantes para la aplicación de esta Ley, como lo indica en su artículo 6°. Asimismo, también se enlistan facultades para la Comisión Reguladora de Energía, entre las cuales están, enunciando la Fracción I del Artículo 7°: “ expedir las normas, directivas, metodologías y demás disposiciones de carácter administrativo que regulen la generación de electricidad a partir de energías renovables, de conformidad con lo establecido en esta Ley, atendiendo a la política energética establecidas por la Secretaria”, además, como lo dice la Fracción VI, “expedir las reglas generales de interconexión al Sistema Eléctrico Nacional que le deberán proponer los Suministradores, escuchando la opinión de los Generadores”.

Finalmente, se faculta a otras dependencias como la Secretaria de Hacienda y Crédito Público, la Secretaria de Economía y la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, para coordinarse con la Secretaria de Energía, en los ámbitos de sus respectivas competencias.

El Capítulo III. De la Planeación y la Regulación, se refiere a la elaboración y contenido del Programa para el Aprovechamiento de las Energías Renovables, en donde deberá, enunciando el Artículo 11°:

- II. Establecer objetivos y metas específicas para el aprovechamiento de energías renovables, así como definir las estrategias y acciones necesarias para alcanzarlas;
- III. Establecer metas de participación de las energías renovables en la generación de electricidad, las cuales tenderán a aumentar sobre bases de viabilidad económica. Dichas metas se expresarán en términos de porcentajes mínimos de capacidad instalada y porcentajes mínimos de suministro eléctrico, e incluirán metas para los suministradores y los generadores.

También se detallaran los mecanismos para el pago de las contraprestaciones que se otorgarán a los generadores de electricidad a partir de energías renovables.

En el Capítulo IV. De la Estrategia Nacional para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía, se prevé que a través de dicha estrategia se impulsarán políticas, programas, acciones e incentivarán proyectos encaminados a conseguir una mayor utilización y aprovechamiento de las fuentes de energías renovables y tecnologías limpias; se promoverá la eficiencia y sustentabilidad energéticas, y se reducirá la dependencia de México a los hidrocarburos como fuente de energía primaria de energía.

Por último se propone la constitución de un Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía, con el fin de asegurar que la transición energética se realice mediante el apoyo de mecanismos de financiamiento que estarán destinados a proyectos estructurados, presentados, evaluados y aprobados, con base en los lineamientos expedidos por el Comité Técnico, que será presidido por la Secretaría de Energía.

4.2. Incentivos para desarrollar proyectos con energías renovables

4.2.1. Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética

En el Artículo 27° de esta nueva Ley, se hace mención a la creación de un nuevo fondo, con fin de promover los objetivos de la Estrategia, dicho artículo se cita a continuación:

“Se crea el Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía.

El Fondo contará con un comité técnico integrado por representantes de las Secretarías de Energía, quien lo presidirá, de Hacienda y Crédito Público, de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, de Medio Ambiente y Recursos Naturales, de la Comisión Federal de Electricidad, de la Compañía de Luz y Fuerza del Centro, del Instituto Mexicano del Petróleo, del Instituto de Investigaciones Eléctricas y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

El comité emitirá las reglas para la administración, asignación y distribución de los recursos en el Fondo, con el fin de promover los objetivos de la Estrategia.

Asimismo, con el propósito de potenciar el financiamiento disponible para la transición energética, el ahorro de energía, las tecnologías limpias y el aprovechamiento de las energías renovables, el comité técnico a que se refiere este artículo, podrá acordar que con cargo al Fondo se utilicen recursos no recuperables para el otorgamiento de garantías de crédito u otro tipo de apoyos

financieros para los proyectos que cumplan con el objeto de la Estrategia”.

Con esto se espera, que las energías renovables tengan un crecimiento en los próximos años para hacer frente a la transición energética.

4.2.2. Fondo Verde

El Fondo Verde, es una propuesta del Gobierno Federal para la creación de un Fondo Mundial contra el Cambio Climático, el cual será destinado a enfrentar dicho problema, además de reducir y evitar las emisiones contaminantes a la atmosfera.

La iniciativa, tiene cuatro objetivos específicos²⁶:

- Fomentar acciones de mitigación
- Apoyar la adaptación a los efectos adversos del cambio climático
- Promover la transferencia y difusión de tecnologías
- Contribuir a sustentar, financieramente, el nuevo régimen climático global.

Con el Fondo Verde se busca ampliar la participación de todos los países que llevan a cabo acciones a favor de un desarrollo limpio, así como sustentar, financiera y tecnológicamente, las medidas de mitigación y adaptación al calentamiento global, considerando integrar un primer fondo de por lo menos mil millones de dólares y comenzar a incrementar estas participaciones, el cual estaría regido por Naciones Unidas a través del Banco mundial o el Banco Interamericano de Desarrollo. Se pretende que este ahorro reciba aportaciones de todos los países involucrados y se encuentre disponible internacionalmente, de manera que los países que adquieran préstamos puedan desarrollar proyectos a cualquier escala de mitigación de emisiones medibles o certificadas.

La importancia de esta propuesta de ahorro, es que además de tener las ventajas mencionadas, la iniciativa proviene de un país no desarrollado (México) y que motiva a otras economías emergentes a un desarrollo sustentable, a la par de economías crecientes, con el uso de nuevas tecnologías y tecnologías limpias por medio de un financiamiento. Otro detalle importante es que el Protocolo de Kioto no contempla todas las escalas de los proyectos, por lo que este fondo puede servir para conseguir los objetivos conjuntos de contrarrestar el cambio climático.

²⁶ Comunicado emitido por la SEMARNAT el 21 de mayo de 2008, página electrónica de la SEMARNAT.

La propuesta fue presentada el 25 de mayo de 2008, en la reunión de ministros de Medio Ambiente en Kobe, Japón. Fue recibida con agrado por parte de los representantes de los países G-8²⁷ y G-5²⁸, se espera que el pacto con las demás economías emergentes pueda concretarse en la Conferencia de Naciones Unidas contra el Cambio Climático, en 2009, en Copenhague, Dinamarca.

4.2.3. Mecanismos de Desarrollo Limpio²⁹

El Protocolo de Kioto define en su Artículo 12 los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL). Los MDL permiten emprender proyectos de reducción de emisiones de gases efecto invernadero, en países en desarrollo para ganar créditos de Reducciones Certificadas de Emisiones (RCE) o bonos de carbono, cada uno equivalentes a una tonelada de dióxido de carbono (CO₂). Estos RCE pueden ser comercializados y vendidos, y usarse por los países industrializados para satisfacer parte de su reducción de emisiones que se trazaron como objetivo en el Protocolo de Kioto.

Los mecanismos ayudan a lograr un desarrollo sustentable y una reducción de emisiones en los países en desarrollo, mientras les da a los países industrializados un poco de flexibilidad en cómo llegan al objetivo planteado.

Los proyectos se deben de evaluar a través de un riguroso y público registro, y emitir un proceso diseñado para asegurar autenticidad, es decir, que las reducciones de emisiones adicionales sean medibles y comprobables respecto a cómo podría haber sido sin el proyecto. Los mecanismos están vigilados por la Junta Ejecutiva del MDL de las Naciones Unidas, la cual tiene la última respuesta a aquellos países que ratificaron el Protocolo de Kioto.

El proyecto está operando desde 2006, a partir de entonces se tiene más de 1,000 proyectos registrados y se prevé que la producción de 2.7 billones de toneladas de CO₂, lo cual equivale al compromiso fijado para el primer periodo, 2008 – 2012. MDL.

²⁷ Grupo de los 8, formado por Alemania, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Japón, Reino Unido y Rusia.

²⁸ Grupo de los 5, formado por Brasil, India, China, Sudáfrica y México.

²⁹ Apartado basado en la información de UNFCCC/CDM International, obtenida de la página electrónica.

En la actualidad, México cuenta con 8 proyectos de Mecanismo para un Desarrollo Limpio, que se ubican en Oaxaca y Baja California. En conjunto suman 2,264 kton/año de emisiones de CO₂ evitadas a la atmosfera.

La Tabla IV.2 muestra los proyectos eólicos MDL y la etapa en la que se encuentra cada proyecto.

Tabla IV.2 Proyectos MDL con energía eólica en México

Nombre del proyecto	Fecha de expedición de la Carta de Aprobación	Etapa del Ciclo del Proyecto	Emisiones evitadas (Ktons CO _{2e} /año)	Ubicación
Bii Nee Stipa-La Ventosa, Gamesa Energía	20 de abril de 2005	Registrado	310	Oaxaca
Bii Nee Stipa III: Parque eólico 164 MW-La Ventosa, Gamesa Energía	8 de marzo de 2006	Registrado	291	Oaxaca
Proyecto Eólico Eurus, CEMEX	4 de agosto de 2006	Registrado	600	Oaxaca
La Venta II, CFE	10 de octubre de 2006	Registrado	193	Oaxaca
La Ventosa Parques Ecológicos de México (PEM)	3 de noviembre de 2006	Registrado	224	Oaxaca
Parque eólica Baja California 2000, Baja California 2000, S.A. de C.V.	27 de agosto de 2007	Validación (PDD-V1 25/06/2007)	17	Baja California
Parque eólico de Bii Stinu, Eoliatic del Istmo, S.A.P. de C.V.	27 de agosto de 2007	Validación (PDD-V1 30/06/2007)	299	Oaxaca
Parque eólico de Santo Domingo, Eoliatic del Pacifico, S.A.P.I. de C.V.	27 de agosto de 2007	Validación (PDD-V1 30/06/2007)	330	Oaxaca
Total de proyectos eólicos		8	2,264	

Fuente: SEMARNAT

4.2.4. Programa de Energías Renovables a Gran Escala (PERGE)

El Programa de Energías Renovables a Gran Escala (PERGE), forma parte de las medidas para ejecutar los compromisos del Gobierno Federal en cuanto a promover un desarrollo sustentable y en consecuencia un fomento a la economía. Este Programa es conducido por la Secretaría de Energía y tiene destinados 25 millones de dólares gestionados por el Banco Mundial provenientes del Fondo

Mundial para el Medio Ambiente.

Sus principales líneas de acción están dirigidas a la participación de la energía eólica en la generación de electricidad. Los recursos destinados al programa servirán para crear un mapa de recurso eólico a nivel nacional, contar con herramientas de pronóstico, análisis y despacho de energía, además de un estudio de desarrollo a largo plazo de la zona del Istmo de Tehuantepec.

Consiste en la inclusión de cinco proyectos de generación eoloeléctrica en el Plan de expansión de la generación de CFE, a petición de la Subsecretaría de Planeación y Desarrollo Tecnológico de la SENER. Cada uno de los proyectos tendrá una capacidad de 101.4 MW y son La Venta III y Oaxaca I, II, III y IV, para desarrollarse en el período de 2007 a 2010 en la región de La Ventosa, en Oaxaca. Otorga un incentivo directo al parque La Venta III de 1.1 centavos de dólar por kW-h para los primeros cinco años de operación. Para posterior expansión de esta tecnología, la SENER considera la administración e impulso de incentivos del Fondo Verde de hasta 1.25 centavos de dólar/kWh para los primeros cinco años de operación de cada central eólica.

4.2.5. Temporada Abierta

Debido a la falta de infraestructura en la región de Oaxaca, los productores independientes interesados en proyectos eólicos no pueden evacuar la energía generada, por lo que de acuerdo con estudios de la CFE se requiere instalar una nueva infraestructura de transmisión.

Por esta razón, la CRE, la CFE y la SENER acordaron llevar a cabo una Temporada Abierta para determinar la capacidad de transmisión que los desarrolladores privados están dispuestos a reservar bajo bases firmes e irrevocables, con objeto de contar con los elementos necesarios para justificar la autorización de los recursos necesarios para un proyecto de obra pública financiada a ser ejecutado por CFE a partir del 2009.

El proyecto, desalojará aproximadamente 2100MW en la zona del Istmo de Tehuantepec, sede de todos los proyectos participantes de la Temporada abierta. La Figura IV.3 muestra la infraestructura a construir para la Temporada Abierta.

Figura IV.3 Infraestructura de transmisión por Temporada Abierta



Fuente: CFE, 2008.

El proceso de temporada abierta representa un incentivo para la generación eoloelectrónica de nuestro país, pues reconoció los principales problemas para su implementación y permitió conocer el interés de los particulares en este rubro. La construcción de estas centrales creará fuentes de trabajo, producción de energía limpia y ha motivado la existencia de una segunda temporada abierta, debido al interés de los productores de generar con energía eólica, que incluya 7000MW adicionales. La segunda temporada se replanteará una vez que hayan concluido las obras correspondientes al período de 2007 a 2010, con el fin de tomar las experiencias obtenidas de dicho proceso.

4.2.6. Programa para la Promoción de Calentadores Solares de Agua en México (PROCASOL)³⁰

La Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae), en colaboración con la Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ por sus siglas en alemán) y la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES), tomaron la iniciativa de diseñar e implantar un programa orientado a apoyar las iniciativas que en México se están considerando y/o desarrollando, a fin de complementarlos, de manera que se amplíe significativamente el mercado de calentamiento solar de agua en el país.

El Programa tiene como propósitos los siguientes:

- Impulsar el ahorro de energía en los sectores residencial, comercial, industrial y agrícola.
- Favorecer el desarrollo de la industria nacional:
 - Fabricantes
 - Diseñadores de sistemas
 - Distribuidores
 - Instaladores de equipos y sistemas
- Promover la adopción de tecnología desarrollada por los centros de investigación nacionales.

La meta fijada en el PROCASOL, es tener instalados, para el año 2012, un millón ochocientos mil metros cuadrados de calentadores solares de agua en México. Para cumplir con dicha meta, se tienen programadas algunas acciones, entre las cuales están incentivos económicos a los usuarios. Dichas acciones en este tema, a grandes rasgos son:

- Convenio de colaboración con la SHCP
- Aplicación de financiamiento hipotecario a la compra de sistemas de calentamiento solar en vivienda nueva
- Fomento de instrumentos financieros disponibles en la banca de desarrollo para aplicaciones productivas
- Fondo especial de fomento

³⁰ Información tomada del propio Programa y de la CONAE.

4.3. Evolución histórica y situación actual

4.3.1. Capacidad instalada

4.3.1.1. Energía eólica

En 1988, se formó la Unidad de Nuevas Fuentes de Energía, en el seno de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la Subdirección de Construcción de la CFE. Entre otras cosas, dicha Unidad enfocó sus esfuerzos a formular y evaluar proyectos eoloeléctricos que pudieran resultar de interés para CFE. Después de estudios realizados por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), la CFE decidió llevar a cabo un proyecto eoloeléctrico piloto en el Corredor Eólico del Istmo.

A finales de 1993, CFE licitó la construcción de una Central Eoloeléctrica de 1,575 kW de capacidad para ser construida en terrenos del Ejido La Venta, Municipio de Juchitán, Oaxaca. Su construcción empezó en enero de 1994 y entró en operación en agosto del mismo año.

La Central Eoloeléctrica La Venta, está integrada por siete aerogeneradores daneses, marca Vestas. La capacidad nominal de dichas máquinas es de 225 KW a 15 m/s. Su rotor mide 27 metros de diámetro y están colocadas sobre torres tubulares de 30 metros de altura. En los dos primeros años de operación, la generación de la central fue de 12.4 GWh, con un factor de planta de 48.1%, resaltando que durante el primer año fue de 51.7%.

Con las modificaciones a la LSPEE y los resultados obtenidos con la central eoloeléctrica La Venta, creció el interés de los inversionistas privados, tanto en el ámbito nacional como en el internacional. A partir de entonces, se sabe que el Corredor Eólico del Istmo es uno de los mejores lugares en el mundo con relación a la disponibilidad del recurso eólico. Estos factores atrajeron a varios desarrolladores de proyectos eoloeléctricos mexicanos y extranjeros, comenzando la explotación de este recurso.

En abril de 1995, Electricidad del Sureste S.A de C.V solicitó permiso ante la SENER para construir y operar una central eoloeléctrica en la modalidad de autoabastecimiento. De acuerdo con la resolución de la CRE, el proyecto tendría una capacidad de 27 MW a conformarse con 96 aerogeneradores de 280 kW cada uno, con un factor de planta 56.7%. La central no se llevó a cabo a pesar de que la CRE otorgó el permiso, ya que el permisionario se atrasó en el comienzo de su

construcción en dos ocasiones debido a que no pudo concretar con CFE la firma del convenio de interconexión y los contratos asociados con los servicios de transmisión y respaldo requeridos.

El siguiente año, la sociedad Fuerza Eólica del Istmo S.A de C.V presentó una solicitud de permiso para generar electricidad en la modalidad de autoabastecimiento. El proyecto tendría una capacidad de 30 MW, pero al igual que el proyecto anterior no pudo concretarse.

Para 1997 se llevaron cabo tres proyectos importantes en Baja California Sur:

- **Puerto Alcatraz.** Planta híbrida eólica solar fotovoltaica localizada en Puerto Alcatraz. Cuenta con una capacidad de 77.3kW formada por 3 aerogeneradores de 5kW cada uno, 2.30kW en arreglos fotovoltaicos, una máquina diesel de 60kW y 200kWh de un banco de baterías, con los que abastece a la región de pescadores durante todo el día. Inició operaciones en julio de 1997. La operación se realiza de forma alternada dependiendo de la disposición de sol y viento que existe durante el día, el banco de baterías se activa si no existen fuentes renovables disponibles con el fin de reservar el diesel como última opción. Reportes de Comisión Federal de Electricidad indican una aportación de aproximadamente el 35 % de fuentes renovables a la planta híbrida.
- **Guerrero Negro.** Planta eoloeléctrica piloto, ubicada en Guerrero Negro. Se construyó mediante licitación pública internacional en septiembre de 1997, bajo el programa de Unidad de Nuevas Fuentes de Energía. Cuenta con un solo aerogenerador de 600kW de Gamesa Eólica, modelo V-44 (diámetro del rotor de 44m y altura de 50m). Abastece de electricidad a la zona a través de su conexión al sistema eléctrico local mediante una línea de 34.5kV. Su factor de planta es de 24% y contribuye con el 5% del consumo de energía total en Guerrero Negro y el desierto del Vizcaino. Opera conjuntamente con la central de diesel de 16MW. Inició operaciones en diciembre de 1998, la velocidad promedio anual del viento en esta zona es de 7.7m/s a 40.5m de altura.
- **San Juanico.** Planta híbrida eólica fotovoltaica diesel, ubicada en Comondú. Tiene una capacidad de generación de 197 kW. Abastece a toda la región durante todo el día. Cuenta con 10 aerogeneradores de 10kW cada uno, diámetro de rotor de 7m y 37m de altura, 17 kW fotovoltaicos repartidos en 60 módulos y un motogenerador diesel de 80kW. El motor diesel opera sólo cuando no hay suficientes recursos renovables y cuando el banco de

baterías no tiene energía almacenada. Fue construida por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), Arizona Public Service, Department of Energy y la Agencia Internacional de Energía.

En ese mismo año en Ramos Arizpe, Coahuila, se llevo a cabo el proyecto piloto de la cementera Apasco que cuenta con un aerogenerador Z-40 Zond Energy Systems de 500kW, bajo el esquema de Autoabastecimiento, conectado al principio a la línea de 38kV de CFE. A pesar de que el recurso eólico es bajo en la zona, después de un tiempo de prueba se verá la posibilidad de construir una planta eoloeléctrica. Se puso en operación en mayo de 1997.

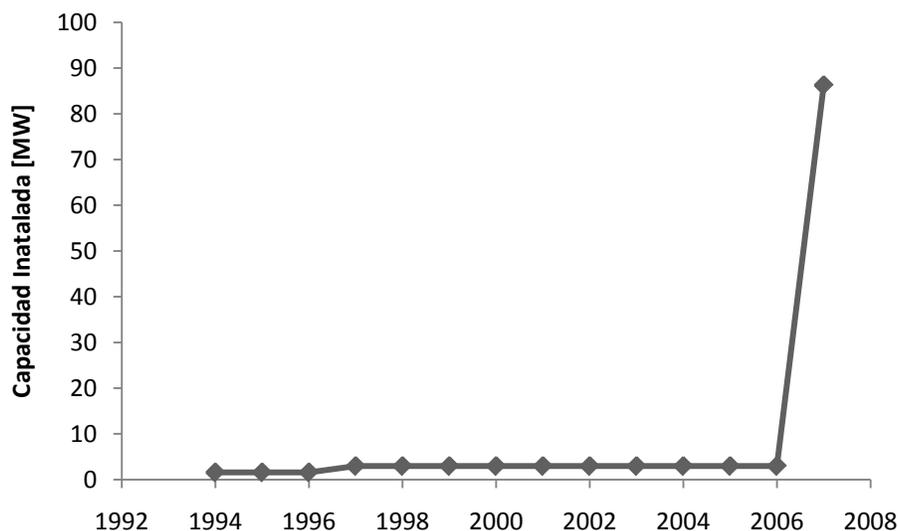
Desde la puesta en marcha de los proyectos mencionados hasta el 2007, no se desarrollaron más proyectos. Es hasta el proyecto de La Venta II, el cual es el primer parque eólico a gran escala construido en México. Se localiza en la parte norte del ejido La Venta, en Juchitán de Zaragoza, Oaxaca. Inició operaciones en febrero de ese año, siendo financiado bajo el esquema de Obra Pública Financiada.

Cuenta con una capacidad de generación de 83.3MW, distribuida en 98 aerogeneradores de 850kW de potencia, con 44m de altura y 52m de diámetro de rotor cada uno. Están distribuidos en 4 filas separadas por 600m entre una y otra, la separación entre unidades es de 2.5 diámetros y ocupa una superficie de 900 hectáreas. El factor de planta es de 45%.

Hasta julio de 2007 reportó un factor de planta promedio de 29.6% debido a los ajustes para entrar en operación. La Venta II es un proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio, en la categoría de Generación de energía renovable para verterla a la red, promovido por la CFE y el Fondo Español de Carbono, gestionado por el Banco Mundial o Banco Internacional para la Reconstrucción y el Desarrollo. Se estima una generación eléctrica de 307,728MWh/año y que evitará emisiones por 192,545 tCO₂e al año.

Para finalizar, en la Figura IV.4 se muestran los proyectos eólicos a través del tiempo.

Figura IV.4 Capacidad Instalada en México (1994 a 2008)



Fuente: SENER, 2007

4.3.1.2. Energía Solar

a. Sistemas Fotovoltaicos³¹

Las actividades en nuestro país relacionadas con la tecnología fotovoltaica (FV) se iniciaron a mediados de los setentas. En la década siguiente, el Centro de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (IPN) construyó una planta piloto para fabricar módulos fotovoltaicos de silicio cristalino, con una capacidad de producción de 15kW por año.

El principal mercado de la tecnología fotovoltaica en nuestro país es el de los sistemas autónomos, utilizados principalmente para la electrificación de comunidades rurales apartadas y se estima que en el país han sido instalados cerca de 100 mil sistemas fotovoltaicos para este fin. Otra aplicación importante que se le ha dado es en la energización de estaciones de retransmisoras de telecomunicaciones, telesecundarias y clínicas rurales.

En 2001, el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), inició un programa al término del

³¹ Información basad principalmente en *IIE, 2008*.

cual se instalaron más de 2 mil bombas fotovoltaicas para el apoyo de productores agropecuarios. Por su parte, Petróleos Mexicanos (PEMEX) ha utilizado ampliamente los sistemas fotovoltaicos para proporcionar energía eléctrica en los sistemas de monitoreo y control de plataformas no habitadas.

En 1997 se realizaron las primeras aplicaciones fotovoltaicas conectadas a red, por parte del Área de Energías No Convencionales del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). Posteriormente se llevaron a cabo proyectos piloto en las ciudades de Mexicali, Baja California y Hermosillo, Sonora. En el año 2005, el Área de Energías No Convencionales del IIE apoyó al gobierno de Baja California, en la especificación de los sistemas FV con una potencia de 1 kWp, en 220 casas habitación, instalados en la ciudad de Mexicali.

Actualmente, en el país operan 3 plantas maquiladoras donde se ensamblan módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologías, destinados al mercado de exportación. Una planta ensambladora de módulos FV que tendrá una capacidad de fabricación de 15 MW/año, inició operaciones a finales de 2007, en el estado de Veracruz. Además, en junio de 2008 se anunció la construcción de un complejo industrial en la ciudad de Mexicali, donde se producirán módulos FV de película delgada y la de una planta FV de 70 MW, para satisfacer parcialmente los requerimientos de energía eléctrica de la ciudad.

La potencia fotovoltaica instalada y acumulada en México hasta finales de 2007 se estima en 20.8 MW, y se espera tener instalados 25 MW con tecnología fotovoltaica para 2013, que generarán 14 GWh/año. Además, para 2009 se espera contar con un sistema híbrido de ciclo combinado acoplado a un campo solar de 25 MW (Agua Prieta II, Sonora).

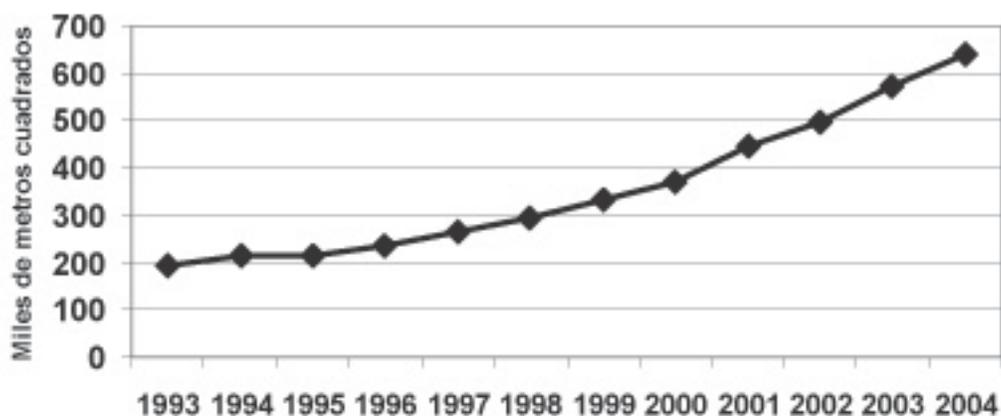
b. Sistemas Fototérmicas

En México, como en el mundo, uno de los principales usos finales de la energía en las actividades humanas es el calentamiento de fluidos, por lo que el uso de esta tecnología ha sido principalmente destinado al calentamiento de agua. En el sector residencial, el agua es calentada para la higiene personal y para el lavado de ropa y/o utensilios relacionados con la preparación y consumo de alimentos, además también es utilizado para calentar el agua de albercas. En el sector de los servicios las aplicaciones son similares (higiene y lavado de ropa y utensilios), pero los volúmenes son significativamente mayores. En actividades industriales, el agua y el aire calientes se emplean

para la producción, tratamiento y/o manejo de bebidas y alimentos, entre otros usos. Finalmente, en el sector agroindustrial, se aplican para fines de higiene o confort en los procesos de crianza y engorda de aves y ganado.

Sin embargo, a pesar de una serie de iniciativas que se han tomado a lo largo de muchos años y de la actual rentabilidad en la aplicación de estos sistemas, en México no se ha logrado aprovechar el potencial de calentamiento de energía solar. De acuerdo con el Balance Nacional de Energía, en 2004 se tenían instalados poco más de 650 mil metros cuadrados¹⁴ y un crecimiento anual de 70,000 m² (Figura IV.5). Según esa misma fuente, ésta capacidad sólo generó 3 PJ de calor útil (lo que equivale a 1.3% del estimado de consumo para calentamiento de agua de baja temperatura en México).

Figura IV.5 Metros cuadrados de calentadores solares instalados en México (1993 a 2004)



Fuente: PROCASOL, 2007

Para el 2006, la cifra aumentó a 839,689 m² instalados, con tecnología de colectores solares planos, utilizados a bajas temperaturas para el calentamiento de agua para albercas y uso diario. La eficiencia promedio a la cual operaron es del 70%, con una radiación solar promedio: 18,841 kJ/m²-día, con lo que se tiene una disponibilidad de calor solar primario de 5.775 petajoules y una generación de 3.913 petajoules.

Actualmente se ha introducido el ciclo combinado para mejorar la eficiencia termodinámica de estos sistemas y se estudia en varios países, entre ellos México, la posibilidad de generar directamente el vapor en el campo de concentradores. Con esto se espera lograr llevar los precios de generación a niveles competitivos con las plantas termoeléctricas convencionales.

4.4. Proyectos comprometidos

Para el periodo 2007 – 2017, la CFE tiene un plan de expansión en donde se incluyen proyectos eólicos, los cuales colaborarán en la adición de 26,487 MW que ayudaran a abastecer el crecimiento de demanda de energía futura aportando 505 MW, dichos proyectos son La Venta III y Oaxaca I, II, III y IV. Las centrales eólicas serán construidas en el periodo de 2007 – 2010 y fueron incluidas en el plan mencionado gracias a la petición de la Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico de la Secretaría de Energía, para contribuir a las acciones del Programa de Energías Renovables a Gran Escala (PERGE). Los parques eólicos asignados para el sector público se muestran en la Tabla IV.3

Tabla IV.3 Proyectos de parques eólicos del sector público a instalarse en 2007-2011

Proyecto Eólico	Capacidad a instalar [MW]
La Venta III	101
Oaxaca I,II,III, IV	404

Fuente: CFE, 2008

La Tabla IV.4, nos muestra los proyectos de autoabastecimiento con energía eólica programados para el 2010, mismos que utilizarán las líneas de transmisión actuales de CFE y con la metodología de porteo aprobada por la CRE. Estos proyectos fueron resultado de los compromisos adquiridos por lo productores independientes y de autoabastecimiento en la Temporada Abierta.

Tabla IV.4 Proyectos de autoabastecimiento que usarán líneas de transmisión actuales

Empresa	Capacidad a Instalar [MW]
Eoliatec del Istmo	21.5
BII NEE STIPA Energía Eólica	26.35
Electricidad del Valle de México	67.5
Fuerza Eólica del Istmo	50

Fuente: CRE, 2008

La Tabla IV.5 contiene los parques eólicos surgidos del proceso de minitemporada abierta, en el

que se comprometieron a cubrir los costos de la infraestructura de red eléctrica.

Tabla IV. 5 Parques eólicos de la minitemporada abierta, a instalarse en diciembre de 2008

Empresa	Capacidad a instalar [MW]
Eurus	300 (actualmente 80)
Parques Ecológicos de México	80

Fuente: CRE, 2008

Los proyectos eólicos comprometidos a sumar capacidad de generación instalada y por lo tanto, requieren de capacidad en la red de transmisión de la zona del Istmo de Tehuantepec, surgidos de la Temporada Abierta, y que entrarán en operación en 2010, están contenidos en la Tabla IV.6.

Tabla IV. 6 Parques eólicos a instalarse en 2012, producto de la temporada abierta

Empresa	Capacidad a instalar [MW]
Fuerza Eólica del Istmo	50
Preneal de México	395.9
Desarrollos Eólicos Mexicanos	227.5
Gamesa Energía	288
Eoliatec del Pacífico	160.5
Eoliatec del Istmo	142.2
Unión Fenosa Generación México	227.5

Fuente: CRE, 2008.

Conclusiones

El marco regulatorio, fue el primer tema que se estudió en este capítulo, en el que se pudieron analizar las diferentes leyes que regulan el sector energético, refiriéndose principalmente a las energías renovables. Con la publicación de dichas leyes se logró un gran avance en cuestión de energías alternativas, dándose así un desarrollo en materia energética. Las principales leyes son las siguientes:

- Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE)
- Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica
- Ley de la Comisión Reguladora de Energía
- Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética

Además del marco regulatorio, se tuvieron que plantear algunas estrategias para dar impulso al uso de energías renovables, por lo que los incentivos fueron parte de dicha planeación. A partir de que se empezaron a incentivar a las empresas, se vio un avance significativo, mismo que se está viendo reflejado en la capacidad instalada de las centrales que utilizan energía renovable que se ha dado en los últimos años.

También se pudo observar cómo se dio la evolución en el uso de la energía solar y eólica, en donde la capacidad instalada ha ido en aumento gracias a los puntos expuestos anteriormente. Esto es más visible si se compara la realización de los proyectos y las modificaciones hechas al marco regulatorio a través del tiempo.

Finalmente, con lo estudiado en este capítulo podemos analizar la situación del país, misma que está en un punto importante en materia energética, ya que con las modificaciones hechas recientemente (2008) se espera un gran desarrollo en el uso de energías renovables y por lo tanto el país se encontrará en una transición en materia energética. Dicha transición se comienza a ver con los proyectos en puerta que ya están comprometidos y que se llevarán a cabo en los próximos tres años.

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

Capítulo 5

¿Hacia una transición a las energías renovables para la generación de energía eléctrica en México?

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

5. ¿Hacia una transición a las energías renovables para la generación de energía eléctrica en México?

Introducción

La transición hacia las energías renovables empleadas para la generación de energía eléctrica, es un tema particularmente importante para el sector energético. Esto debido, al creciente desarrollo que se está dando en las tecnologías para la generación de electricidad, así como por los compromisos internacionales adquiridos con motivo del cambio climático. Encaminando así, a la comunidad mundial al crecimiento importante en el uso de dichos recursos diferentes a los hidrocarburos.

En el presente capítulo se realiza un análisis del consumo de los combustibles para la generación de energía eléctrica destinada al servicio público en México, para el periodo 1965 – 2007 y 2007 – 2017. Esto, con el fin de poder comprender cómo se ha comportado a través del tiempo este sector energético y visualizar futuros probables del mismo.

En la primera parte del capítulo, se presenta el consumo de combustibles destinados a la generación de energía eléctrica, para el periodo 1965 – 2007 y 2008 – 2017. Para el primer periodo, se estudia la evolución que han tenido los combustibles a través del tiempo y se definen las eras correspondientes para el combustible predominante. En base a esto, se hace un análisis histórico para poder identificar las causas del por qué de la utilización de ciertos combustibles en específico.

Posteriormente, en la segunda parte, se realiza un estudio para el periodo correspondiente al 2007 – 2017. Siguiendo el análisis anterior, y con información obtenida de la SENER, se presenta una prospectiva a diez años, en donde se analizan los principales factores que influyen en este resultado.

Finalmente, en la última parte del capítulo, se presenta el estudio de los factores que están influyendo en la transición energética hacia el uso de las energías renovables en la generación de electricidad con el propósito de intuir su futuro en los próximos años.

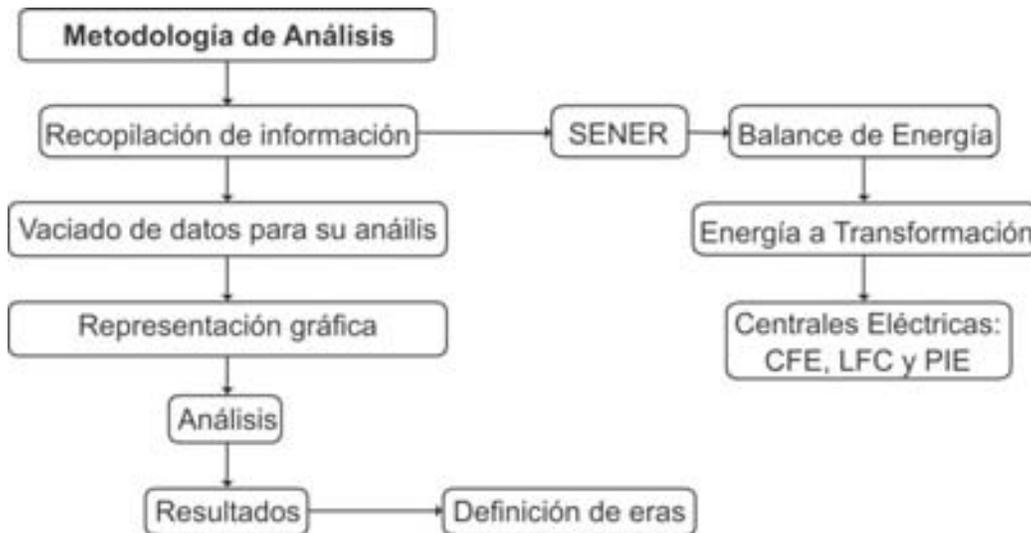
5.1. Energía primaria empleada para generar energía eléctrica para el sector público en el periodo 1965 – 2007

5.1.1. Metodología de análisis

La oferta interna bruta de energía primaria, tiene dos destinos principales: la energía que se canaliza a los centros de transformación y la utilizada por los consumidores finales como energético y materia prima (consumo no energético). Una pequeña parte de la energía primaria es consumida por el sector energético y otra se puede perder en los procesos de transporte, distribución y almacenamiento. La energía destinada a los centros de transformación, es enviada a las coquizadoras, refinerías, plantas de gas y centrales eléctricas. Es la energía enviada a las centrales eléctricas la que es de nuestro interés.

Para estudiar la evolución de la energía destinada a la generación de energía eléctrica, se llevó a cabo la metodología mostrada en la Figura V.1.

Figura V.1 Metodología para el análisis de energía primaria empleada para generar energía eléctrica



Fuente: El autor

El primer paso para el análisis, fue la recopilación de los datos. La información confiable sobre las fuentes energéticas utilizadas históricamente en México, no se remonta más allá del año del 1965. Es por esta razón, que el análisis de la evolución es realizado a partir de esta fecha.

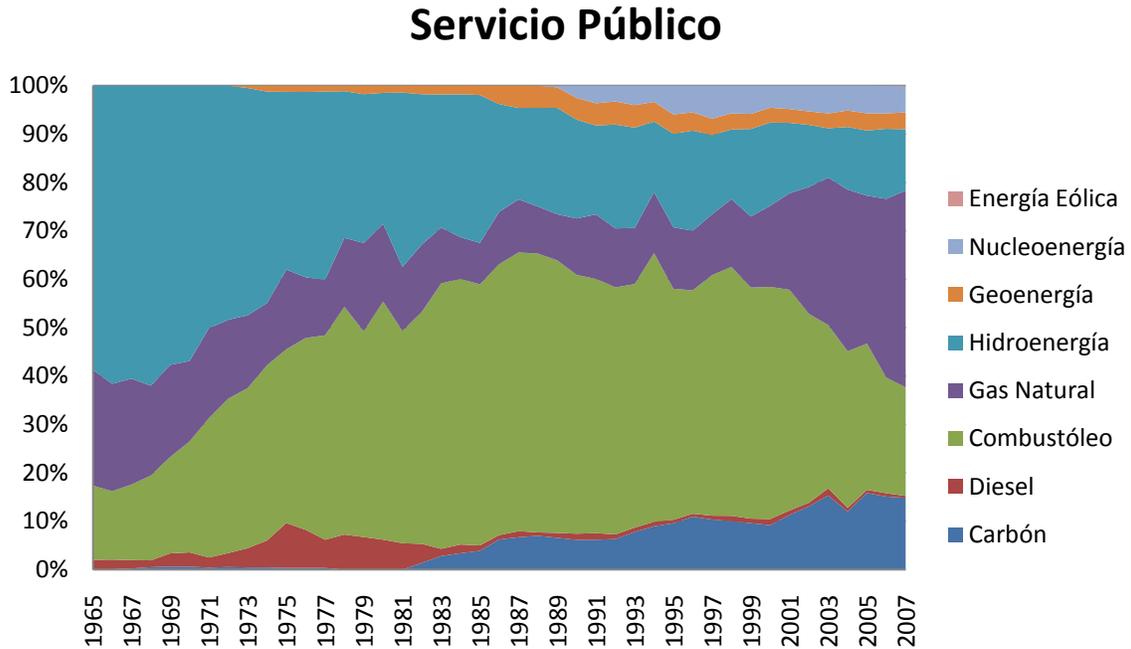
Los datos de la energía enviada a las centrales eléctricas, fueron obtenidos de la SENER a través de los balances nacionales de energía y la información estadística encontrada en su página electrónica. Esto se llevó a cabo, localizando en cada balance de energía anual, la energía que era destinada para su transformación en energía eléctrica, la cual es enviada a centrales eléctricas de CFE, Luz y Fuerza del Centro (LFC) y a los Productores Independientes de Energía (PIE).

Toda esta información recopilada, fue vaciada en una hoja cálculo para poder hacer un análisis más completo de cómo se dio la evolución de la utilización de los combustibles en el periodo de estudio.

Posteriormente, se realizó una gráfica por áreas apiladas del 100% (Figura V.2), con el fin de poder apreciar con mayor facilidad la evolución de cada combustible, para así observar con más claridad la predominancia de éstos conforme el paso del tiempo.

La Figura V.2, nos muestra la evolución que se ha tenido desde 1965 hasta 2007, en el consumo de energía que se destina para la generación de electricidad en el servicio público. En esta gráfica, podemos observar un crecimiento acelerado en el consumo de combustibles fósiles durante las dos primeras décadas. Posterior a éstas, se visualiza un comportamiento más uniforme. Además se puede ver con claridad, como es que predomina siempre algún combustible respecto a los demás.

Figura V.2 Evolución de la energía destinada a transformación de energía eléctrica



Fuente: El autor con datos de la SENER, 2009

5.1.2. Resultados: Definición de eras

Retomando la observación, de la predominancia de algún combustible en ciertos periodos de tiempo, se prosiguió a calcular para cada año el porcentaje aportado por cada tipo de combustible. También se calculó la tasa de crecimiento para cada año con respecto al anterior.

Con estos datos, se fue marcando, en la gráfica original, aquel año donde algún combustible superaba a los demás, es decir, el año en el que el país consumía un porcentaje importante de este combustible para la generación de energía eléctrica.

El resultado, fue el dominio de tres combustibles en el sector de la generación de energía eléctrica, en el periodo de 1965 – 2007. Con este criterio, se definieron las siguientes eras:

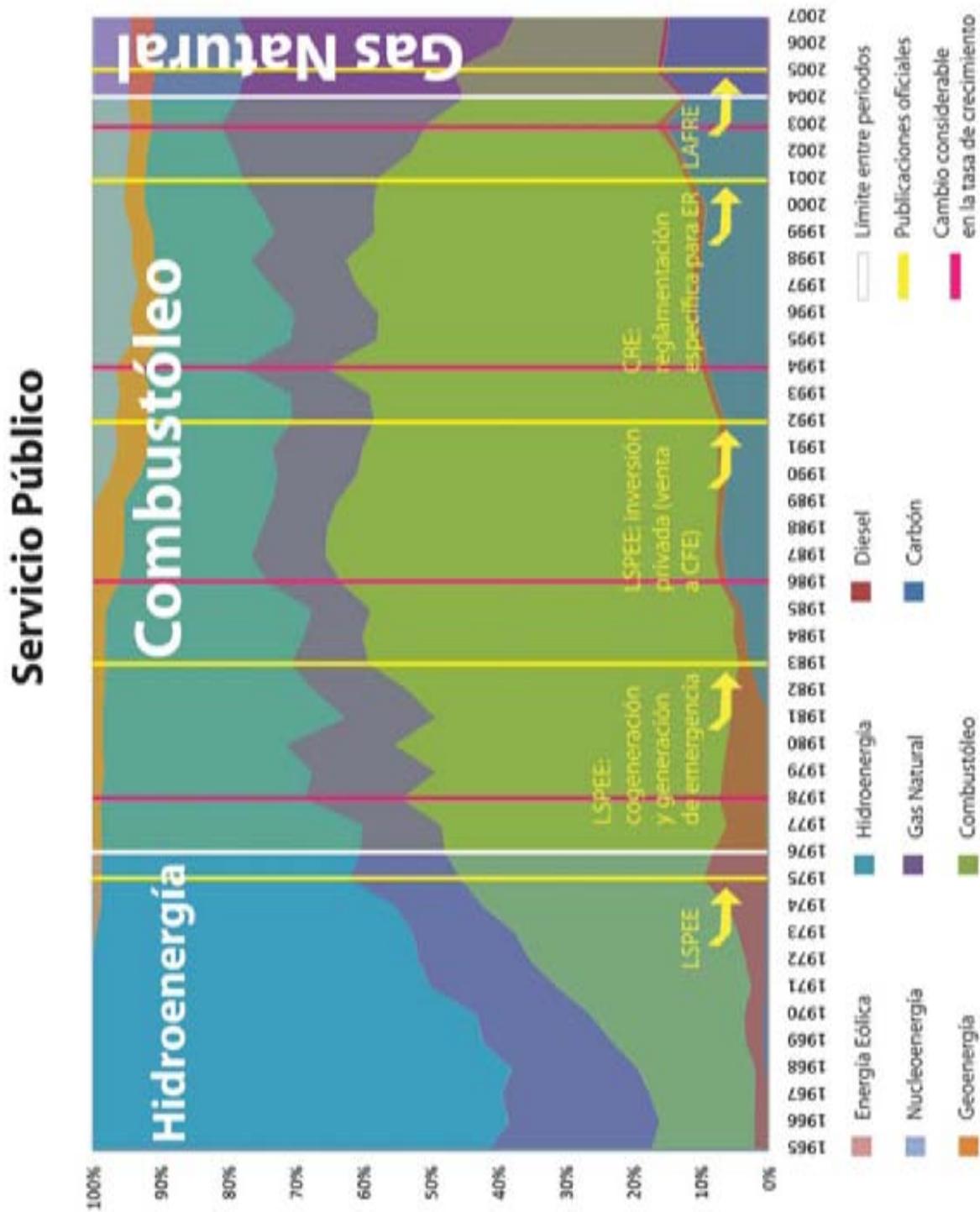
- Hidroenergía: 1965 – 1975
- Combustóleo: 1976 – 2003
- Gas Natural: 2004 – 2007

Teniendo definidas las eras, se dio a la tarea de ir marcando cada cambio regulatorio, para así identificar la influencia de éste en el uso de los combustibles. Para dicho fin, también se señaló cada cambio significativo en la tasa de crecimiento anual posterior al cambio en la regulación.

Esto se observa con mayor claridad en la Figura V.3, en la que además de resaltar las eras mencionadas (líneas blancas), muestra los principales cambios al marco regulatorio eléctrico (líneas amarillas), mismos que se estudiaron en el capítulo anterior. Además, como ya se mencionó, señala los años en el cual se da un incremento en la tasa anual considerable, posterior al cambio en el marco regulatorio (líneas rojas).

En la siguiente sección se hará un análisis más profundo del tema, estudiando cada periodo mencionado.

Figura V.3 Evolución de la energía destinada a transformación de energía eléctrica:
Definición de eras



Fuente: El autor con datos de la SENER, 2009

5.2. Análisis del periodo 1965 - 2007

5.2.1. Era de la Hidroenergía: 1965 – 1975³²

La utilización de la hidroenergía, data de finales del siglo XIX. El primer aprovechamiento hidroeléctrico se inauguró en 1889, siendo la primera central eléctrica registrada en el país. Desde entonces, se comenzaron a dar concesiones para los aprovechamientos hidráulicos a diferentes empresas extranjeras.

A partir de estos hechos, se comenzó a dar gran impulso al uso de energía hidráulica, ya que se contaba con el recurso y las empresas tenían mucho interés en este tipo de centrales eléctricas.

Para 1937, año en que creó la CFE, ya se tenían 15 centrales hidroeléctricas de particulares, y para 1945 la CFE comienza sus grandes proyectos hidroeléctricos. Cabe resaltar que la industria petrolera, baja su producción después de su expropiación en 1938 y se recupera hasta la década de los 70's.

El periodo que abarca de la creación de CFE a la nacionalización de la industria eléctrica en 1960, 23 años, CFE instala sólo centrales hidroeléctricas, un total de 25 centrales. Sumando así, poco más de 40 centrales hidroeléctricas en el país. Los siguientes 16 años, se instalan 17 centrales más, pero a la vez se comienza proyectos termoeléctricos (14 centrales instaladas).

A partir de 1976, la hidroenergía comienza a bajar su tasa de crecimiento del 7% (periodo de 1965 – 1976) al 2% en el periodo comprendido hasta el 2007. En dicho periodo, sólo se construyeron 13 hidroeléctricas, mientras que en el mismo periodo se instalaron 85 centrales termoeléctricas. Con esto concluye así, el periodo de la hidroenergía.

³² Datos históricos recopilados de la página electrónica de LFC: www.lfc.gob.mx

5.2.2. Era del Combustóleo: 1976 – 2003³³

La explotación del petróleo en México, data de mediados del siglo XIX, y la operación de las primeras termoeléctricas de finales del mismo siglo. La producción de petróleo tuvo un crecimiento acelerado en el siglo XX, colocándose en el segundo país productor en el año de 1921.

Después de la expropiación de la industria petrolera en 1938, Pemex experimenta una tendencia a la baja en la producción. Es hasta 1945, con el descubrimiento de nuevos yacimientos de petróleo y gas, que Pemex aumenta su productividad, pero continúan los desequilibrios comerciales entre oferta y demanda, y finalmente en 1962 fue el primer año que pudo operar sin pérdidas. Cuatro años después, deja de exportar crudo y reduce las exportaciones de derivados y gas natural, además la producción nacional ya no permitía satisfacer plenamente la demanda interna.

Entre 1971 y 1976, se dan nuevos descubrimientos de petróleo y gas en las áreas productoras de Tampico, Reynosa y Poza Rica. Se localizan 5 campos de gas en Nuevo Laredo y se realizan los primeros hallazgos en áreas geológicas de Chiapas y Tabasco. Estos últimos, propiciaron el repunte de la producción nacional. Para 1978 esta región petrolera proveía 79% de la producción total del país, convirtiéndose consecuentemente en el centro principal de reservas. También comienza la explotación de depósitos submarinos en la Sonda de Campeche.

Aprovechando este hecho, se da un rápido crecimiento en la instalación de centrales termoeléctricas, CFE instaló el 50% de sus termoeléctricas en el periodo de 1960 a 1976, ya que el crecimiento de la energía primaria enviada a centros de transformación se cuadruplicó de 1965 a 1985.

Es en este momento, cuando el combustóleo comienza a dominar el campo de energía enviada a transformación para la generación de energía eléctrica. A partir de entonces, los cambios en la tasa de crecimiento de este combustible se vieron determinados por el comportamiento en la producción de hidrocarburos.

Es por esta razón que tiene un crecimiento máximo hasta 1988, donde obtiene el máximo porcentaje con 57.6% del total de la energía que consumían las centrales eléctricas. Esto debido a que en 1986, se

³³ Información tomada de una investigación hecha por el Colegio de México y publicada su página electrónica: www.colmex.mx

desata una crisis petrolera que se agudiza en 1991. Cinco años después, Pemex logra aumentar su producción, lo cual se ve reflejado en el combustóleo, el cual aumenta su consumo en este año, siguiendo esta tendencia por dos años más.

A pesar de que Pemex aumenta su producción para años posteriores, el combustóleo tiene una tendencia a la baja, comenzando a crecer el uso de gas natural por los beneficios que se empiezan a aprovechar de este combustible.

5.2.3. Era del Gas Natural: 2004 - 2007

Como se mencionó en el capítulo dos, en 1992 se llevó a cabo la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Desarrollo y Medio Ambiente, donde se plantearon los principales problemas ambientales que podrían afectar los ecosistemas y la calidad de vida de la humanidad. Posteriormente en 1997, es firmado el Protocolo de Kyoto, el cual tiene por objeto tener un total de recorte de las emisiones de gases de efecto invernadero de al menos el 5% con respecto a los niveles de 1990 en el periodo de compromiso de 2008-2012.

A partir de esto, el gas natural comienza a jugar un papel importante en la diversificación de fuentes de suministro de energía a nivel mundial, ya que tiene mejores eficiencias en las centrales termoeléctricas, además de caracterizarse por ser un combustible limpio, el cual emite menos gases de efecto invernadero que los hidrocarburos y el carbón.

Aunado a esto, la demanda de este combustible, la disponibilidad de oferta mundial y los menores costos, se combinaron para mejorar las condiciones, tanto, que por primera vez los países tuvieron mayor accesibilidad en términos económicos para importarlo.

Con este antecedente, México comenzó a emitir políticas públicas y cambios a su marco regulatorio, para hacer frente a los compromisos adquiridos. Estas políticas estuvieron dirigidas al ahorro de energía, eficiencia energética y a la promoción de la utilización de energías renovables. Un antecedente importante, fueron las reformas hechas a la LSPEE en 1992 para permitir la inversión privada en la generación de energía eléctrica para su venta exclusiva a la CFE, los llamados productores independientes de energía (PIE), además de perfeccionar las figuras de autoabastecimiento, cogeneración, pequeña producción y producción independiente como formas de generación que no constituyen servicio público.

Partiendo de esto, México comenzó a tener una reestructuración en el sector eléctrico alentado por el desarrollo de nuevas tecnologías que fueron elevando la eficiencia de las centrales termoeléctricas convencionales que consumen gas natural, pasando de 37% a 60% en algunos casos, además de que la capacidad instalada necesaria para la obtención de estas eficiencias, disminuyó.

Fue entonces, en el año 2000³⁴, cuando el gobierno decidió que el sector eléctrico sustentara gran parte de su extensión en la tecnología de ciclo combinado, la cual tiene como beneficios su eficiencia técnica y la productividad. Con esta tecnología, tanto CFE como los PIE's, impulsaron el desarrollo regional y la protección al medio ambiente. Los autoabastecedores y cogeneradores, adoptaron también la tecnología del ciclo combinado, el cual les ofrece alta eficiencia, mayor generación de potencia, menor contaminación ambiental, gran flexibilidad para operar, mayor seguridad en la recuperación de la inversión, a través del mejoramiento y confiabilidad de la energía eléctrica requerida en sus procesos productivos (*SENER, 2001*).

Para el 2004, entró en operación la primera repotenciación de unidades termoeléctricas convencionales para formar ciclos combinados, y un año después, se puso en operación por primera vez la conversión de centrales turbogás a ciclos combinados (*CFE, 2009*).

Por último, en el 2006, entro en operación comercial la terminal de Altamira, Tamaulipas, en donde se encuentra una estación de almacenamiento y gasificación. Esto con el fin de enfrentar la problemática de importar gas del sur de Texas, y con el objeto de diversificar su suministro a las centrales eléctricas en esta región.

5.3. Análisis del periodo 2008 – 2018: uso más extensivo del gas natural

Analizada la evolución de la energía destinada a generación eléctrica, podemos pasar a hacer ahora el análisis de la prospectiva a 10 años.

Comenzaremos con el Plan Nacional de Desarrollo 2007- 2010, donde se plantean las siguientes estrategias:

- Promover el uso eficiente de la energía para que el país se desarrolle de manera sustentable, a través de la adopción de tecnologías que ofrezcan mayor eficiencia energética y ahorros a

³⁴ Con la publicación del Programa Sectorial de Energía 2001 – 2006.

los consumidores.

- Fomentar el aprovechamiento de fuentes renovables de energía y biocombustibles, generando un marco jurídico que establezca las facultades del Estado para orientar sus vertientes y promoviendo inversiones que impulsen el potencial que tiene el país en la materia.
- Intensificar los programas de ahorro de energía, incluyendo el aprovechamiento de capacidades de cogeneración.
- Aprovechar las actividades de investigación del sector energético, fortaleciendo a los institutos de investigación del sector, orientando sus programas, entre otros, hacia el desarrollo de las fuentes renovables y eficiencia energética.
- Fortalecer las atribuciones de instituciones de regulación del sector.

Con base en estas estrategias, la SENER estableció los siguientes lineamientos para la elaboración del plan de expansión del sistema de generación:

- Desarrollar fuentes de energía renovable a fin de alcanzar una participación en la capacidad de generación de 25%.
- Mantener una participación de 40% por tecnología de generación a base de gas natural.
- Desarrollar la generación a base de carbón, manteniendo su participación en 15% como máximo. Así mismo se recomienda atender los compromisos de sustentabilidad ambiental implementando las tecnologías necesarias para el abatimiento de emisiones.
- Mantener una cota máxima del 8% para proyectos que se dejarían con libertad para definir posteriormente la tecnología más conveniente, y mantener invariable la participación de la energía nucleoelectrica.
- Reducir la participación de las tecnologías a base de combustóleo y diesel a 12%.

Para poder continuar con el análisis, estudiaremos algunas ventajas de tecnologías que están involucradas en las estrategias antes mencionadas (CFE, 2008):

- **Centrales Carboeléctricas.** El uso del carbón resulta atractivo tomando en cuenta que:
 - Estas plantas constituyen una tecnología madura.
 - Resulta el energético primario con más reservas a nivel mundial.
 - El precio del energético ha sido menos volátil.

Sin embargo, de intensificarse su uso, se necesitarán establecer lineamientos de política energética y de utilización de combustibles, para realizar acciones con el fin de ratificar y garantizar los recursos de carbón mineral en las regiones de Sabinas y Río Escondido en Coahuila, Cabullona y Barranca en Sonora, y de Tlaxiaco y San Juan Diquiya en Oaxaca, o bien incrementar su importación. Así mismo se deberán desarrollar estrategias de compra de carbón a largo plazo que garanticen precios competitivos.

Además de las inversiones necesarias en estas centrales (más altas que para las de ciclo combinado) también se requieren algunas adicionales para la recepción y manejo del carbón, así como la construcción o adecuación de puertos e infraestructura para el transporte de este energético en el territorio nacional.

Otra consideración, es el cumplimiento de la normativa ambiental, en donde se tiene que tomar en cuenta las inversiones asociadas a equipos anticontaminantes.

- **Centrales nucleoelectricas.** En los últimos años, el avance en esta tecnología ha permitido un incremento importante en la seguridad de su operación, sin embargo sus costos nivelados de generación aún son altos, en comparación con las tecnologías convencionales, por lo que su utilización se prevé en el largo plazo. Tiene el atractivo de reducir la emisión de gases de efecto invernadero, lo que hace competitivas en escenarios con restricciones en el suministro y altos precios del gas natural.
- **Centrales hidroelectricas.** Si bien son llevados los costos de inversión y en algunos casos existen problemas sociales y ambientales derivados de su construcción, operan competitivamente en las horas de demanda máxima y ofrecen los beneficios siguientes:
 - Utilizan energía renovable.
 - No contaminan el ambiente.
 - Su construcción tiene el mayor componente de integración nacional.
 - Las obras civiles y las presas generalmente pueden destinarse a otros usos como riego, control de avenidas en ríos, agua potable, turismo y navegación entre otros.
- **Ciclos combinados con gasificación integrada.** El atractivo de esta tecnología, es la posibilidad del aprovechamiento de diversos combustibles mediante su gasificación, con el fin de obtener gas de síntesis para ser utilizado en las turbinas de gas de un ciclo

combinado. La gasificación de carbón, biomasa y residuos de refinación son operaciones por considerar. Con este proceso se avanza en la solución del problema ambiental asociado con la combustión de energéticos primarios de baja calidad.

En base a lo anterior, la CFE, en su Programa de Obras e Inversiones en el Sector Eléctrico (POISE) 2009 – 2018, tiene diferentes proyectos para cada campo:

- **Repotenciones.** En este rubro se incluyen las repotenciones para las unidades 1 y 2 de la central termoeléctrica Manzanillo I. La capacidad total de cada una será de 760 MW, con una eficiencia cercana al 50%. El mismo arreglo aplica para las unidades 1 y 2 de Manzanillo II.

Sin embargo, con base en los avances tecnológicos en la evolución de costos y en los requerimientos de transmisión asociados a la segunda fase, se está analizando la conveniencia de que la capacidad adicional requerida para Manzanillo II se proporcione mediante ciclos combinados nuevos en otros sitios del área Occidental, con lo que se podrían reducir riesgos inherentes en repotenciones, tales como extensión de vida útil, eficiencia y capacidad.

La decisión dependerá de que los beneficios económicos logrados por repotenciar sean significativos, en comparación con los obtenidos en los ciclos combinados nuevos.

Para el caso de las repotenciones de las unidades 1, 2 y 3 de Valle de México indicadas en el programa 2006 – 2016, la actualización de las evaluaciones técnicas y económicas mostraron ventajas respecto a la consideración de ciclos combinados nuevos, por lo que se decidió cancelarlas, y se sustituyeron por los proyectos Valle de México II y III de 601 MW de capacidad cada uno.

A partir de los resultados para el caso de Manzanillo I, se analizará la opción de aplicar dicha tecnología a otras termoeléctricas existentes. Esta alternativa permitiría el reemplazo de capacidad en zonas estratégicas del Sistema Interconectado Nacional y, en su caso daría solución al problema ambiental en la región correspondiente a cada una de las plantas involucradas.

- **Centrales eoloeléctricas.** Como parte del PERGE, la SENER solicitó a CFE incluir cinco proyectos eoloeléctricos de 101,1 MW cada uno en su plan de expansión de la generación.

Así se considerarán centrales de este tipo: La Venta III y Oaxaca I, II, III y IV, con una capacidad total de 507 MW durante 2008 – 2011, por ubicarse en el Istmo de Tehuantepec en la región de la Ventosa.

Para este tipo de proyectos, en la evaluación económica se han considerado incentivos económicos del fondo verde del Banco Mundial que administrará la SENER, hasta por un máximo de 1.09 centavos de dólar/kWh durante los primeros cinco años de operación de la central. Posteriormente a estos se consideran beneficios por venta de bonos de carbón.

- **Centrales carboeléctricas.** Sobre la base de los escenarios de precios de los combustibles definidos por la SENER en febrero de 2008, y los costos de inversión para las diversas tecnologías de generación, el desarrollo de centrales basadas en el uso de carbón resulta competitivo a mediano y largo plazo. De esta manera se incluyen, además del proyecto Carboeléctrica del Pacífico de 678 MW (actualmente en construcción en la central Petacalco), dos plantas carboeléctricas supercríticas de 700 MW cada una a partir de 2017.

La opción de gasificación de carbón integrada a ciclo combinado se considera como alternativa para la capacidad, a partir de 2017.

Tomando en cuenta lo anterior, la Figura V.4 nos muestra la participación de las tecnologías en el total de la capacidad efectiva para el servicio público en 2007 y 2017.

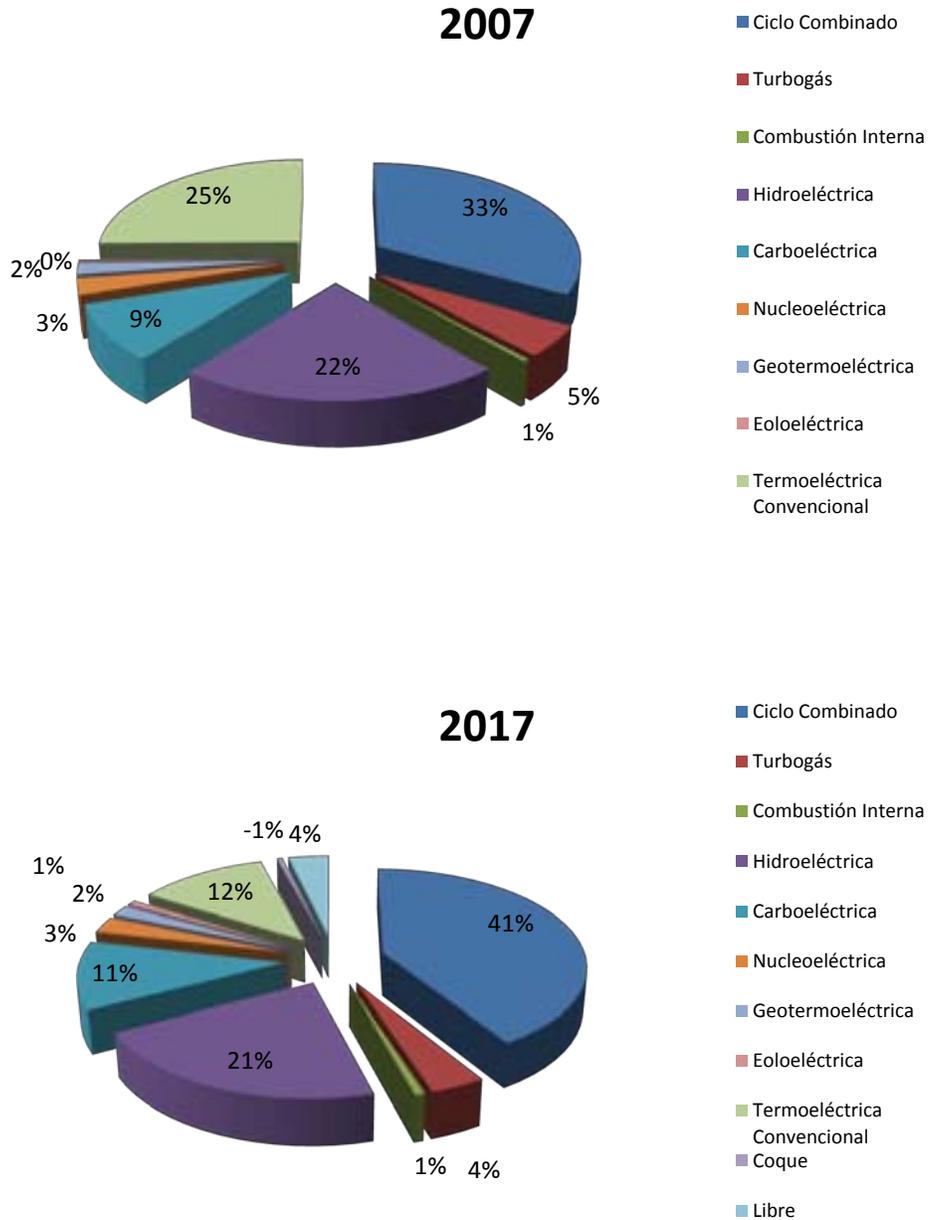
Teniendo en mente todo lo anterior, en la Prospectiva 2008 – 2017 se estima que la electricidad generada aumente con un ritmo de 3.3% en promedio anual durante este periodo. Para los combustibles fósiles, se proyecta que el combustible de mayor crecimiento en su utilización será el gas natural, con 5.0% en promedio anual, mientras que el combustóleo mostrará la mayor disminución anual con -7.6%, seguido por el diesel con -6.3%. Se prevé que el carbón aumente con un ritmo de 3% anual.

En base al análisis hecho a lo largo de esta sección, podemos tener un panorama general de cómo es

que se va a comportar el consumo de combustibles para la generación de energía eléctrica:

- Continuará el periodo del gas natural, gracias a sus ya tan mencionados beneficios, por los cuales se han considerados nuevos proyectos utilizando la tecnología de ciclo combinado y la repotenciación de centrales termoeléctricas convencionales y turbogás.

Figura V.4 Participación de tecnologías en la capacidad de generación en Servicio Público

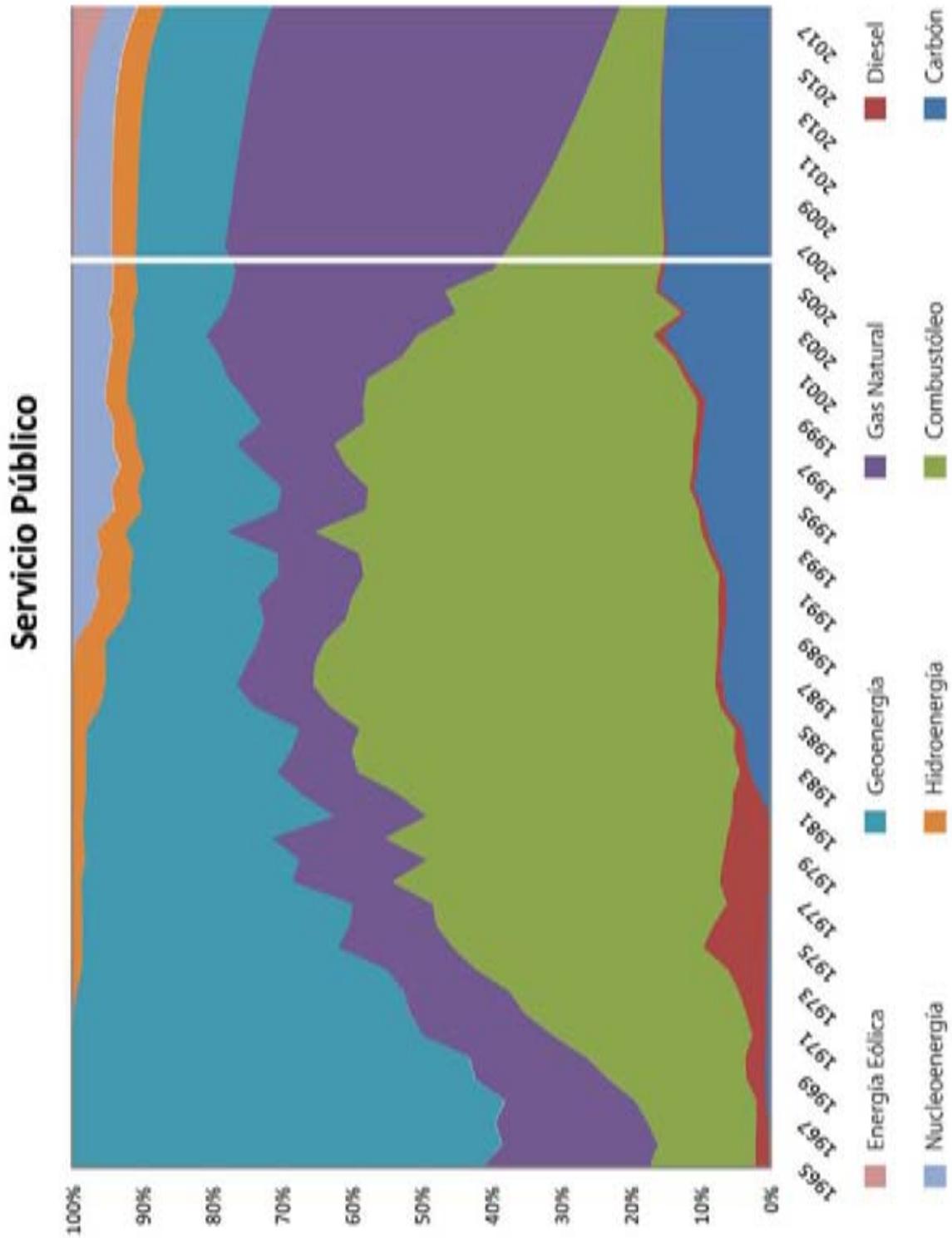


Fuente: El autor con datos de la CFE, 2009

- La reducción del consumo del combustóleo seguirá debido al aumento en el uso del gas natural en centrales existentes para cumplir con la normatividad ambiental, al incremento de la capacidad instalada en ciclos combinados a gas natural, al incremento de centrales carboeléctricas y al retiro de unidades termoeléctricas convencionales con baja eficiencia y bajo factor de planta.
- El uso del carbón se incrementará gracias a las centrales programadas para el 2010, 2017 y 2018. Además de la opción de utilizar la tecnología de gasificación de carbón integrada a ciclo combinado.
- La energía eólica utilizada en la generación de energía eléctrica, se verá incrementada gracias a los proyectos a desarrollarse en la región de la Ventosa. Además tiene la ventaja de que se considera como alternativa para la capacidad con tecnología libre.

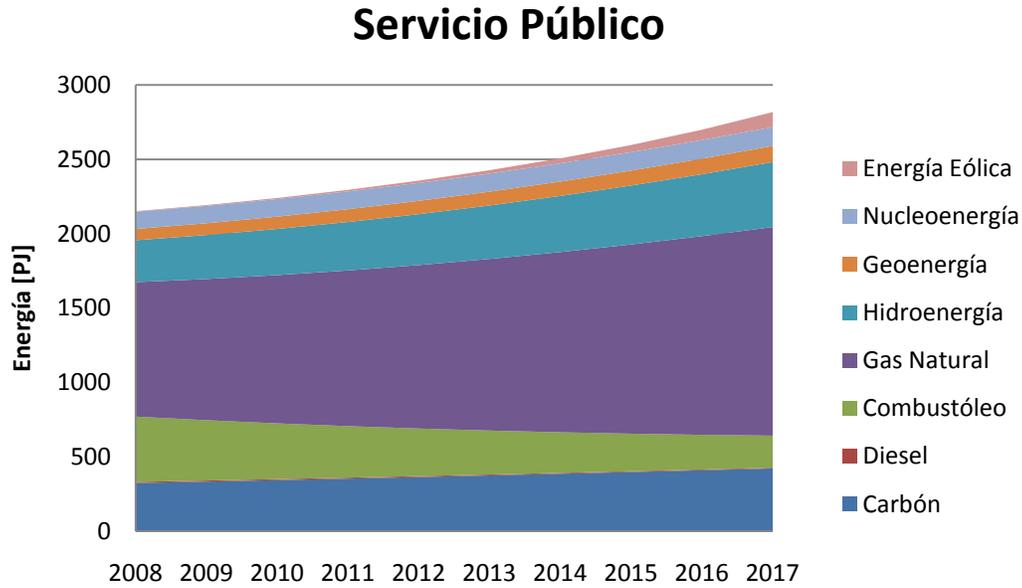
En la Figura V.5 y la Figura V.6, se puede visualizar con mayor claridad lo antes mencionado. La primera, nos muestra la evolución de la utilización de la energía destinada a la generación de electricidad junto con la prospectiva a diez años. La segunda, nos muestra específicamente el periodo de 2007 – 2017, en el que podemos apreciar con mayor claridad la prospectiva.

Figura V.5 Prospectiva de la energía destinada a transformación de energía eléctrica 2007 - 2017



Fuente: El autor con datos de la CFE y SENER, 2009

**Figura V.6 Energía destinada a transformación de energía eléctrica
periodo: 2007 – 2017**



Fuente: El autor con datos de la CFE y la SENER, 2009

5.4. ¿Hacia una transición encaminada a las energías renovables?

A lo largo del desarrollo del capítulo, se ha estudiado el uso de combustibles para la generación de energía eléctrica, comenzando desde 1965 hasta el 2007, y con el objetivo de hacer la prospectiva 2008 – 2017 para así poder determinar cómo es que se está dando o se dará la transición al uso de energías renovables.

Un estudio realizado por el *IILSEN, 2004*, similar al presentado en esta tesis, nos plantea tres escenarios de desarrollo de la oferta eléctrica en México posibles. Estos son, el del combustóleo, el del gas natural y el de las fuentes renovables de energía. El primero, representa la prolongación en el futuro del modo de expansión de la oferta eléctrica que predominó hasta finales de los años 80. El segundo simula la extensión de la tendencia actual de crecimiento del sector eléctrico que se establece a inicios de los años 90. Por último, el tercero es un escenario alternativo y posible basado en un uso masivo de las fuentes renovables de energía en el sector eléctrico mexicano.

Como se pudo observar en el apartado anterior, el escenario que se presentó a partir del 2004 fue el segundo, y la tendencia hacia los próximos años es la misma.

Recapitulando, la Tabla V.1 nos muestra los factores que definieron los tres periodos energéticos a lo largo del periodo estudiado.

Tabla V.1 Análisis de los principales factores determinantes para el predominio del combustible

Energético	Disponibilidad del Recurso	Marco Regulatorio Favorable	Otros
Hidroenergía 1965 – 1975	México contaba con el recurso energético para su explotación.	Marco regulatorio adecuado: otorgación de concesiones.	→ Interés de las empresas por la explotación del recurso. → Crisis petrolera.
Combustóleo 1976-2003	Crecimiento acelerado de la producción del recurso.	Marco regulatorio propicio para el crecimiento del empleo del recurso: LSPEE (1975)	Auge petrolero
Gas Natural 2004 – 2007	Facilidad económica de importación del recurso.	→ Políticas públicas internacionales y nacionales dirigidas hacia la eficiencia energética. → LSPEE: creación de los PIE's (1992).	Desarrollo de nuevas tecnologías más eficientes, como el ciclo combinado.

Fuente: El autor

Ahora presentaremos en la Tabla V.2, los factores que se encuentran a favor de que se presente un escenario en el cual se desarrolle favorablemente la energía eólica:

Tabla V.2 Análisis de los principales factores determinantes para el posible predominio de la energía eólica

Disponibilidad del Recurso	Marco Regulatorio Favorable	Otros
México cuenta con un potencial alrededor de 40,000 MW en toda la república.	→LSPEE: 1975, 1983, 1992: autoabastecimiento, cogeneración, pequeña producción y producción independiente. →Cambio climático (1992). →LCRE (1995). →Protocolo de Kioto (1997). →PSE (2001-2006): uso de ER y eficiencia energética. →Iniciativa LAFRE (2005). →Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición (2008).	→ Interés de las empresas privadas por la explotación del recurso.

Fuente: El autor

Teniendo en cuenta estos factores, se retomarán los estudios hechos en capítulos anteriores, para poder comprender un poco más la situación de México.

Como se estudió en el capítulo dos, dentro de las motivaciones que han impulsado a las diversas naciones hacia una transición energética que permita el desarrollo de fuentes de energías renovables, encontramos:

- **Seguridad Energética.** A partir de los años setenta, se han presentado situaciones de incrementos en los precios del petróleo que han tenido fuertes efectos sobre las economías de los países. La importación de petróleo puede tener efectos importantes sobre las divisas internacionales y, por ende, afectar el desarrollo económico de las naciones.

La falta de estabilidad en los precios del petróleo ha complicado la planeación energética, e inclusive la planeación económica, en muchos países del mundo. Existe una corriente de analistas que prevén que esta inestabilidad continúe, sobre todo cuando se considera que la producción ha empezado a decrecer en algunos de los principales países productores de petróleo. Dado lo anterior, los gobiernos de varios países procuran la diversificación de las

fuentes de energía y buscan en el desarrollo de las energías renovables una fuente de energía local que no tenga que ser importada.

- **Desarrollo Rural.** El desarrollo de cualquier industria, para el aprovechamiento de fuentes de energía renovable, podría ampliar el acceso a los sistemas de energía, crear fuentes de trabajo y aumentar el ingreso en zonas rurales. Este es un punto que requiere especial consideración, ya que el desarrollo sustentable de las zonas rurales y, en especial, de zonas remotas o marginadas, es una prioridad de cualquier nación.
- **Impactos Ambientales.** Uno de los principales beneficios ambientales de utilizar fuentes renovables para producir energía, es el potencial que éstas pueden presentar para reducir la emisión de gases de efecto invernadero que se asocian al uso de las fuentes de energía fósil.

Tras la adopción del Protocolo de Kioto en 1997, diversos gobiernos adquirieron compromisos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de sus economías nacionales. Además de la firma de dicho Protocolo, también se han adoptado compromisos en diversos foros como, en la Conferencia Internacional para las Energías Renovables (Bonn 2004), compromisos relativos a el aumento de manera sustancial y con carácter de urgente la participación global de las energías renovables en la oferta energética.

Por sí misma, la diversificación de las fuentes energéticas a partir del uso de energías renovables representará un mecanismo para reducir la dependencia de México en los combustibles fósiles, y así fomentar la seguridad energética.

En materia rural, el aprovechamiento de las energías renovables también será un motor para el desarrollo del campo mexicano, al permitir el acceso al servicio eléctrico a comunidades donde la energía convencional es económicamente inviable por estar apartadas de la red eléctrica y creando fuentes de empleo.

En el rubro ambiental, la utilización de energías renovables además de contribuir a mejorar la calidad del aire, contribuye a la conservación de los recursos naturales.

Finalmente, en materia económica representará la integración de nuevas actividades productivas a la economía nacional, con los efectos que ello conlleva, tales como la creación de pequeñas y

medianas empresas, la generación de empleos, el intercambio comercial, y el desarrollo científico y tecnológico. Asimismo, se evitará la especulación y la incertidumbre derivados de la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles.

Aunado a todo lo anterior, México cuenta con un gran potencial eólico y solar, como se analizó en el capítulo tres. En el país, se han identificado diferentes zonas con potencial para la explotación eólica para la generación eléctrica, como en el Istmo de Tehuantepec, en el estado de Oaxaca, La Rumorosa en el estado de Baja California, así como en los estados de Zacatecas, Hidalgo, Veracruz, Sinaloa y en la Península de Yucatán, entre otros. El recurso se cuantifica en un potencial de 40,000 MW. Por su parte, el recurso solar cuenta con índices que van de los 4.4 kWh/m² por día en la zona centro, a los 6.3 kWh/m² por día en el norte del país (*SENER, 2006*).

También, otro aspecto importante son las políticas públicas y el marco regulatorio. En México, como estudiamos en el capítulo cuatro, estas políticas se comenzaron a dar en 1975, aunque todavía no con la fuerza necesaria para impulsar a las energías renovables. Fue casi dos décadas después, que con los acuerdos internacionales enfocados al cambio climático, que en México le empieza a dar más peso a las políticas públicas y al marco regulatorio enfocando al uso de estos energéticos y a la eficiencia energética.

Es así como en el año de 1994, se instala la primer central eoloelectrónica. A partir de ese momento se comienzan a hacer una mayor cantidad de estudios sobre la evaluación del recurso eólico en el país y su potencial de generación. Como ya se mencionó, se llegó a la conclusión de que México tenía un gran potencial, según estudios del NREL y diversas instituciones.

Con este antecedente, es hasta el año 2000, que con la publicación del PND 2001 – 2006, se empiezan a dar compromisos en esta materia y reafirmando la idea de ser un país eficiente en materia energética.

Es este el momento, en donde la energía eólica y solar pudieron haber comenzado a desarrollarse rápidamente, pero por cuestiones técnicas y legales no se pudo dar ese paso y en 2004 sólo contaba con 3 MW de capacidad instalada. Es entonces donde el gas natural comienza a tomar ventaja de sus beneficios y del marco regulatorio. A pesar de que México no contaba con las reservas suficientes para no importar este energético, el gobierno decidió que el sector eléctrico sustentara gran parte de su extensión en la tecnología de ciclo combinado y es así cómo el gas natural

comienza a tener dominio en la generación de energía eléctrica.

Gracias a la publicación de instrumentos regulatorios por parte de la CRE en apoyo al uso de energía renovable y eficiencia energética, se tienen ya proyectos que se realizarán en el periodo de 2008 – 2011, como primera etapa, ya que no se descarta utilizar la generación libre con esta tecnología.

Por otra parte, con la publicación en noviembre de 2008 de la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición, se pretende dar una mayor certidumbre a estos proyectos.

Actualmente, se está dando un gran esfuerzo para poder cumplir con el Programa Sectorial de Energía 2007-2012, en donde las metas generales, basadas en las estrategias y objetivos son las siguientes:

- Alcanzar un porcentaje de generación de energía eléctrica con energías renovables del 26% para el 2012.
- Lograr evitar la emisión de 28 millones de toneladas de bióxido de carbono (Mt CO₂) provenientes de la generación de energía eléctrica, por la utilización de energías renovables, para el 2012.
- Ampliar el portafolio energético del país, impulsando una mayor seguridad energética al no depender de una sola fuente de energía.
- Ampliar la cobertura del servicio eléctrico en comunidades remotas utilizando energías renovables en aquellos casos en que no sea técnica o económicamente factible la conexión a la red.
- Impulsar el desarrollo de la industria de energías renovables en México, al involucrar a pequeñas y medianas empresas en sus diferentes etapas productivas.
- Mantener una coordinación interinstitucional permanente para multiplicar la promoción de energías renovables.
- Invertir en investigación y desarrollo a fin de desarrollar tecnologías que hagan más eficiente el uso de energías renovables.

A pesar de los esfuerzos que se han hecho para tener una mayor presencia de los recursos renovables en el sector eléctrico, al corto y mediano plazo, no se dará una transición encaminada al

uso de estos recursos, pero sí se está dando el primer paso para tener una diversificación en el suministro de energía destinada a la generación de energía eléctrica.

También resaltar, que probablemente no tengamos una era eólica, pero sí una era en la que las energías renovables jueguen un papel importante junto con el gas natural. Esto debido a que la tendencia de México y el mundo, es el uso de energías alternativas y de la eficiencia energética.

Conclusiones

A lo largo de todo el capítulo, se pudieron observar diferentes factores que fueron definiendo las respuestas de nuestras preguntas de investigación planteadas al inicio de este trabajo: ¿El sector energético en México se encuentra en una etapa de transición hacia una mayor utilización de las energías renovables en la generación de energía eléctrica? y ¿Cuáles son las causas que han originado tal situación?

En general podemos concluir, que a pesar de los esfuerzos que se han hecho para tener una mayor presencia de los recursos renovables en el sector eléctrico, al corto y mediano plazo, no se dará una transición encaminada al uso de estos recursos, pero sí se está dando el primer paso para tener una diversificación en el suministro de energía destinada a la generación de energía eléctrica. También cabe resaltar, que probablemente no tengamos una era eólica, pero sí una era en la que las energías renovables jueguen un papel importante junto con el gas natural. Esto debido a que la tendencia de México y el mundo, es el uso de energías alternativas y de la eficiencia energética.

La causa de que esta etapa de transición no se diera a corto plazo, fue la falta de apoyo que se le debió dar a partir del año 2000 con la publicación del Plan Nacional de Desarrollo 2001 – 2006, donde se comienzan a dar compromisos en materia de energías renovables y se reafirma la idea de ser un país eficiente en materia energética. Es este el momento, en donde la energía eólica y solar pudieron haber comenzado a desarrollarse rápidamente, pero por cuestiones técnicas y legales no se pudo dar ese paso. La ventaja, la toma el gas natural gracias a sus beneficios energéticos y ambientales, y del marco regulatorio. Cuestiones por las cuales, el gobierno decidió que el sector eléctrico sustentara gran parte de su extensión en la tecnología de ciclo combinado, dándose así la era del gas natural.

Por otro lado, se pudieron identificar las agentes que propiciaron la definición de eras. Para la era de la hidroenergía, periodo 1965 – 1975, se observó que México tenía el recurso energético para su explotación. Además, se contaba con un marco regulatorio que propiciaba la otorgación de concesiones, aunado con el interés que presentaban las empresas privadas por explotar el recurso natural. Otro factor de importancia, fue la crisis petrolera, la cual propició la diversificación de combustibles para la generación de energía eléctrica.

El periodo de 1976 – 2004, fue la era del combustóleo. El factor principal fue el auge petrolero en México, ya que gracias a él se contaba con el recurso y además, se realizó un marco regulatorio que propiciaría su utilización (LSPEE, 1975).

La era del gas natural comienza en el año 2004, teniendo gran fuerza debido a las políticas públicas tanto nacionales como internacionales, dirigidas hacia el ahorro de energía y la eficiencia energética. México toma la decisión de generar electricidad con este combustible, a pesar de no ser autosuficientes, debido a la facilidad económica de importación del recurso y el desarrollo de nuevas tecnologías más eficientes, como el ciclo combinado. En el marco legal se aprueban los PIE's, los cuales generan electricidad con dicha tecnología.

Por último, mencionar que México cuenta con los recursos energéticos, dispone de un reciente marco regulatorio favorable y se tiene gran interés tanto del sector público como privado, para desarrollar proyectos de generación de energía eléctrica con recursos renovables. Por tal motivo, a continuación se mencionan algunos aspectos que serían de gran ayuda para seguir fomentando el crecimiento del uso de energías renovables, y dar el primer paso para la diversificación del suministro de energía para la generación eléctrica:

- Difundir ampliamente las ventajas e impactos ambientales, sociales y económicos que derivan del aprovechamiento de fuentes renovables de energía.
- Apoyar el establecimiento y/o fortalecimiento de organismos que se dediquen a la promoción de eficiencia energética y energías renovables.
- Impulsar la instalación de energías renovables en los programas de vivienda que sean apoyados por el Gobierno Federal.
- Ampliar la cobertura del servicio eléctrico en comunidades remotas, utilizando energías renovables en aquellos casos en que no sea técnica o económicamente factible la conexión a la red.
- Fomentar la inversión privada para la creación y fortalecimiento de empresas de energías renovables.
- Desarrollar esquemas de financiamiento que agilicen e incrementen el aprovechamiento de fuentes renovables de energía.
- Fomentar el uso de energías renovables en instalaciones del sector público.
- Impulsar la implementación de sistemas que empleen fuentes renovables de energía.
- Apoyar la creación de laboratorios de certificación de productos y sistemas de energías

renovables.

- Formular proyectos demostrativos y programas de implementación en esta materia.
- Apoyar las actividades de investigación y de capacitación de recursos humanos en materia de energías renovables.
- Apoyar el desarrollo de instrumentos técnicos y jurídicos para el uso de los permisos de autoabastecimiento de las plantas que funcionan con energía renovable y asegurar el cumplimiento expedito y transparente de dichos instrumentos.
- Impulsar la cooperación entre los sectores público, privado y social para el desarrollo de esquemas de fomento a las fuentes renovables de energía

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

Conclusiones Generales

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

Conclusiones Generales

A nivel mundial, el tema de la seguridad energética y del cambio climático ha causado, en general, un gran cambio en el sector energético de las naciones. Este cambio, va inclinado hacia una transición energética, en la cual se utilicen energías alternativas para la generación de electricidad. Esto, con el fin de ampliar las fuentes de suministro de energía eléctrica y mitigar el impacto al ambiente.

México no es la excepción, y es por esto que en el presente trabajo se planteó la siguiente problemática: ¿El sector energético en México se encuentra en una etapa de transición hacia una mayor utilización de las energías renovables en la generación de energía eléctrica? y ¿Cuáles son las causas que han originado tal situación? A lo largo del desarrollo de este trabajo, se fue acumulando la información necesaria para poder contestar estas preguntas.

El primer factor a analizar, fueron las experiencias internacionales, en donde observamos que las motivaciones que han impulsado a las diversas naciones hacia una transición energética que permita el desarrollo de fuentes renovables de energía, es la seguridad energética y los compromisos internacionales adquiridos debido al cambio climático.

A partir de los años setenta, se han presentado situaciones de incrementos en los precios del petróleo que han tenido fuertes efectos sobre las economías de los países. La importación de petróleo puede tener efectos importantes sobre las divisas internacionales y, por ende, afectar el desarrollo económico de las naciones. Además, la falta de estabilidad en los precios del petróleo ha complicado la planeación energética, e inclusive la planeación económica, en muchos países del mundo. Existe una corriente de analistas que prevén que esta inestabilidad continúe, sobre todo cuando se considera que la producción ha empezado a decrecer en algunos de los principales países productores de petróleo. Dado lo anterior, los gobiernos de varios países procuran la diversificación de las fuentes de energía y buscan en el desarrollo de las energías renovables una fuente de energía local que no tenga que ser importada.

Tras la adopción del Protocolo de Kioto en 1997, diversos gobiernos adquirieron compromisos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de sus economías nacionales. Además de la firma de dicho Protocolo, también se han adoptado compromisos en diversos foros, para fomentar la participación global de las energías renovables en la oferta energética.

Para los países estudiados, Alemania, España y Estados Unidos, se observó que el factor principal para que se pudiera dar este cambio, fueron las políticas públicas, tanto nacionales como internacionales, y los diversos cambios en los marcos regulatorios para el apoyo a los energéticos alternativos.

Posteriormente, la tarea es la de estudiar el potencial de los recursos eólicos y solares del país, de donde se obtuvieron los siguientes resultados:

- México cuenta con por lo menos cinco regiones que cuentan con un recurso eólico aprovechable, estas regiones son: la Península de Baja California, la Península de Yucatán, el altiplano Norte, la región centro y costas del país. El recurso se cuantifica en un potencial de 40,000 MW (*SENER, 2006*).
- Las regiones con mayor radiación solar son las de Sonora, Chihuahua y el oriente de la península de Baja California. Puede considerarse que estas zonas son las más apropiadas para la instalación de sistemas que requieren de una alta incidencia de radiación solar. Existen otras dos regiones bien definidas con más de 19 MJm^{-2} en el año: una que abarca Durango, Zacatecas y Aguascalientes, y la otra, la mayor parte de Puebla, Guerrero y Oaxaca. Los índices del recurso solar para estas regiones, van de los 4.4 kWh/m^2 por día en la zona centro, a los 6.3 kWh/m^2 por día en el norte del país (*SENER, 2006*).

Teniendo en mente que México cuenta con los recursos naturales necesarios para poder apoyar la generación de energía eléctrica con éstos, y que las políticas públicas y el marco regulatorio son un factor importante para dar este impulso, se realizó un análisis del marco regulatorio del país y su situación actual. Es este análisis se encontró, que las principales leyes que regulan al sector de la generación de energía eléctrica, son las siguientes:

- Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE)
- Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica
- Ley de la Comisión Reguladora de Energía
- Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética

Además, se observó que el eje que impulsará el desarrollo en el uso de las energías renovables, es el Programa Sectorial de Energía 2007-2012 y la reciente modificación (2008) del marco regulatorio en materia de energías renovables, los cuales comienzan a reflejar un avance con los proyectos en puerta que ya están comprometidos y que se llevarán a cabo en los próximos tres años.

El siguiente paso para completar nuestra metodología de análisis, fue realizar un análisis del consumo de los combustibles para la generación de energía eléctrica destinada al servicio público en México, para el periodo 1965 – 2007 y 2007 – 2017. Esto, con el fin de poder comprender cómo se ha comportado a través del tiempo este sector energético y poder definir las transiciones que se han dado y que podrían darse.

Finalmente, para dar respuesta a las preguntas planteadas originalmente, presentadas de nueva cuenta al inicio de esta sección, se concluye lo siguiente:

Al corto y mediano plazo, no se dará una transición encaminada al uso de energías renovables, a pesar de los esfuerzos que se han hecho para tener una mayor presencia de estos recursos en el sector eléctrico. Sin embargo, sí se está dando el primer paso para tener una diversificación en el suministro de energía destinada a la generación de electricidad. También cabe resaltar, que probablemente no tengamos una era eólica, pero sí una era en la que las energías renovables jueguen un papel importante junto con el gas natural. Esto debido a que la tendencia de México y el mundo, es el uso de energías alternativas y de la eficiencia energética.

La causa de que esta etapa de transición no se diera a corto plazo, fue la falta de apoyo que se le debió dar a partir del año 2000 con la publicación del Plan Nacional de Desarrollo 2001 – 2006, donde se comienzan a dar compromisos en materia de energías renovables y se reafirma la idea de ser un país eficiente en materia energética. Es este el momento, en donde la energía eólica y solar pudieron haber comenzado a desarrollarse rápidamente, pero por cuestiones técnicas y legales no se pudo dar ese paso. La ventaja, la toma el gas natural gracias a sus beneficios energéticos y ambientales, y del marco regulatorio. Cuestiones por las cuales, el gobierno decidió que el sector eléctrico sustentara gran parte de su extensión en la tecnología de ciclo combinado, dándose así la era del gas natural.

Retomando lo visto a lo largo de la tesis, México cuenta con los recursos energéticos necesarios para incursionar en la generación de energía eléctrica, dispone de un reciente marco regulatorio favorable y se tiene gran interés tanto del sector público como privado, para desarrollar proyectos de generación de energía eléctrica con recursos renovables. Por tal motivo, a continuación se mencionan algunos aspectos que serían de gran ayuda para seguir fomentando el crecimiento del uso de energías renovables, y dar el primer paso para la diversificación del suministro de energía para la generación eléctrica:

- Difundir ampliamente las ventajas e impactos ambientales, sociales y económicos que derivan del aprovechamiento de fuentes renovables de energía.
- Apoyar el establecimiento y/o fortalecimiento de organismos que se dediquen a la promoción de eficiencia energética y energías renovables.
- Impulsar la instalación de energías renovables en los programas de vivienda que sean apoyados por el Gobierno Federal.
- Ampliar la cobertura del servicio eléctrico en comunidades remotas, utilizando energías renovables en aquellos casos en que no sea técnica o económicamente factible la conexión a la red.
- Fomentar la inversión privada para la creación y fortalecimiento de empresas de energías renovables.
- Desarrollar esquemas de financiamiento que agilicen e incrementen el aprovechamiento de fuentes renovables de energía.
- Fomentar el uso de energías renovables en instalaciones del sector público.
- Impulsar la implementación de sistemas que empleen fuentes renovables de energía.
- Apoyar la creación de laboratorios de certificación de productos y sistemas de energías renovables.
- Formular proyectos demostrativos y programas de implementación en esta materia.
- Apoyar las actividades de investigación y de capacitación de recursos humanos en materia de energías renovables.
- Apoyar el desarrollo de instrumentos técnicos y jurídicos para el uso de los permisos de autoabastecimiento de las plantas que funcionan con energía renovable y asegurar el cumplimiento expedito y transparente de dichos instrumentos.
- Impulsar la cooperación entre los sectores público, privado y social para el desarrollo de esquemas de fomento a las fuentes renovables de energía

Por último mencionar que los resultados presentados en esta tesis, dan la pauta para abrir nuevos temas de investigación. Como por ejemplo, la actualización del trabajo hecho por el *IILSEN*, 2004, donde se podría retomar el estudio de los posibles escenarios, tomando en cuenta el nuevo marco regulatorio aprobado en 2008.

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

Referencias

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

Referencias Bibliográficas

- **AEE (2008).** “Eólica 2008, Anuario del Sector: análisis y datos”, Asociación Empresarial Eólica. España, 2008.
- **Avallone, E.A. (1999).** “Mark’s Standard Handbook for Mechanical Engineers”. Mc Graw Hill, 10ª Edición. EUA, 1999.
- **Beltrán H. y Urias F. (2005).** “Aspectos tecnológicos, económicos y medioambientales del uso de gas natural para la generación de energía eléctrica en México”. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, 2005.
- **BOE (2005).** “Real Decreto 436/2004”. Boletín Oficial del Estado. España, 2004.
- **Borja M. (2005).** “Primer documento del Proyecto Eoloeléctrico del corredor eólico del Istmo de Tehuantepec”. Instituto de Investigaciones Eléctricas. México, 2005.
- **Borja, M. (2005)(a).** “Prospectiva de la Tecnología de Generación Eoloeléctrica”. Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- **Bösl, B. (2007).** “Energías Renovables – Perspectivas mundiales y su Potencial en México”. GTZ México. México, 2007.
- **Castañeda, A. (2008).** “Generación de energía eléctrica en México a partir de energías renovables: participación de las empresas privadas”. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, 2008.
- **CFE (2005).** “Costos y parámetros de referencia para la formulación de proyectos de inversión en el Sector Eléctrico”. Subdirección de Programación, Gerencia de Evaluación y Programación de Inversiones. México, 2005.
- **CFE (2008).** “Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2008-2017”. Subdirección de Programación, Coordinación de Planificación. México, 2008.
- **CFE (2009).** “Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2009 – 2018”. Subdirección de Programación, Coordinación de Planificación. México, 2009.
- **CNE (2008).** “Ley del Sector Eléctrico”. Comisión Nacional de Energía. España, 2008.
- **Comisión Europea (1997).** “Energía para el futuro: Fuentes de energía renovables. Libro blanco para una estrategia y un plan de acción comunitarios”. Unión Europea, 1997.
- **CONAE (2001).** “Aspectos relevantes de energía eólica Windpower 2001”. Comisión Nacional para el Ahorro de Energía. México, 2001.
- **CONAE (2007).** “Programa para la Promoción de Calentadores Solares de Agua en México. Procalsol 2007-2012”. Comisión Nacional para el Ahorro de Energía. México, 2007.

- **CRE (2008)**. “Temporada abierta en Oaxaca. Primer Encuentro Internacional para el fomento de las Energías Renovables en el Estado de Oaxaca”. Comisión Reguladora de Energía. México, 2008.
- **Creus, A. (2004)**. “Energías Renovables”. Ediciones Ceysa. España, 2004.
- **Department of Energy (2005)**. “Renewables Portfolio Standard Overview”. Energy Efficiency and Renewable Energy. Estados Unidos, 2005.
- **DOCE (2001)**. “Directiva 2001/77/ce del Parlamento Europeo y del Consejo”. Diario Oficial de las Comunidades Europeas. Unión Europea, 2000.
- **DOF (1993)**. “Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica”. Diario Oficial de la Federación. México, 1993.
- **DOF (1995)**. “Plan Nacional de Desarrollo 1995-2000”. Diario Oficial de la Federación. México, 1993.
- **DOF (2001)**. “Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica”. Diario Oficial de la Federación. México, 2001.
- **Eckermann, A. (2008)**. “Energía Solar en México – Estado actual y perspectivas”. GTZ. México, 2008.
- **Elvira, R. (2004)**. “Perspectiva del Mercado de la Energía Renovable en México”. Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte, Reunión Trinacional. Canadá, 2004.
- **Fernández, P. (2001)**. “Energía Eólica”. Universidad de Cantabria. España, 2001.
- **Gaceta Parlamentaria (2008)**. “Ley de la Comisión Reguladora de Energía”. México, 2008.
- **Gaceta Parlamentaria (2008)**. “Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y Financiamiento de la Transición Energética”. México, 2008.
- **González, R. (1974)**. “Plantas Eléctricas, Apuntes”. IPN. México, 1974.
- **Guillen, O. (2004)**. “Energías Renovables, Una perspectiva ingenieril”. Editorial Trillas. México, 2004.
- **IEA (2004)**. “Renewable Energy, Market and Policy Trends in IEA Countries”, International Energy Agency. Francia, 2004.
- **IEA (2005)**. “Energy Policies of IEA Countries. Spain”. International Energy Agency. Francia, 2005.
- **IEA (2007)**. “Renewables Information”. International Energy Agency. Francia, 2007.
- **II (2005)**. “Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, en la República Mexicana”. Instituto de Ingeniería, UNAM. México, 2005.

- **II (2008)**. “Energía y cambio climático”. Instituto de Ingeniería, UNAM. México, 2008.
- **IIE (2008)**. “Tendencias Tecnológicas” Instituto de Investigaciones Electricas. México, 2008.
- **IIE y UNAM (1998)**. “Estado del arte y tendencias de la tecnología eoloeléctrica”, Instituto de Investigaciones Eléctricas. México 1998.
- **INEGI (2000)**. “Información Geográfica”. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, 2000.
- Investigaciones Eléctricas. México, 2005.
- **Jarabo, F. (2000)**. “Energías Renovables”. S.A.P.T. Publicaciones Técnicas, 2ª Edición. España, 2000.
- **Jinchuk, D. (2003)**. “Energía Nucleoeléctrica”. Comisión Nacional de Energía Atómica. Argentina, 2003.
- **Martínez, J. (1997)**. “Análisis teórico para el cálculo técnico – económico de una planta termoeléctrica”. ESIME, IPN. México, 1997.
- **MIE (1999)**. “Plan de fomento de las Energías Renovables en España 2000 – 2010, Resumen”. Ministerio de Industria y Energía. España, 1999.
- **MIE (2005)**. “Plan de Energías Renovables en España 2005 – 2010, Resumen”. Ministerio de Industria y Energía. España, 2005.
- **MME (2005)**. “Atlas de Radiación Solar de Colombia”. Ministerio de Minas y Energía. Colombia, 2005.
- **NREL (2003)**. “Wind Energy Resource. Atlas of Oaxaca”. National Renewable Energy Laboratory. Estados Unidos, 2003.
- **Orille, A. (1996)**. “Centrales eléctricas I. Introducción al sector eléctrico y al sistema de energía eléctrica. Centrales Hidroeléctricas, Centrales Térmicas”. Universidad Politécnica de Catalunya, 2ª Edición. España, 1996.
- **PND (2001)**. “Programa Sectorial de Energía 2001 – 2006”. Programa Nacional de Desarrollo. México, 2001.
- **SENER – SEMARNAT (2002)**. “Programa Energía y Medio Ambiente Hacia el Desarrollo Sustentable SENER– SEMARNAT 2002”. Secretaria de Energía. México, 2002.
- **SENER (2001)**. “Prospectiva tecnológica del sector energía para el siglo XXI Visión al 2003”. Secretaria de Energía. México, 2000.
- **SENER (2002)**. “Programa de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Sector Energía 2002 – 2006”. Secretaria de Energía. México, 2002.

-
- **SENER (2006)**. “Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México”. Secretaria de Energía. México, 2006.
 - **SENER (2007)**. “Prospectiva del Sector Eléctrico 2007-2016”. Secretaria de Energía. México, 2007.
 - **SENER (2008)**. “Prospectiva del Sector Eléctrico 2008-2017”. Secretaria de Energía. México, 2008.
 - **SERI (1981)**. “A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces”. Solar Energy Research Institute. USA, 1981.
 - **SERI (1987)**. “A Quasi – Physical Model for Converting Hourly Global Horizontal to Direct Normal Insolation”. Solar Energy Research Institute. USA, 1987.
 - **Zeferino, Y. (2006)**. “Viabilidad Técnico – Económico de Proyectos Ambientales en Instalaciones de Pemex a través del Mercado de los Bonos de Carbono en el Marco del Protocolo de Kyoto”. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, 2006.
 - **IILSEN (2004)**. “Nuevas Energías Renovables: Una Alternativa Energética Sustentable para México (Análisis y Propuesta)”. Instituto de Investigaciones Legislativas del Senado de la República. México, 2004.
 - **SENER (2003)**. “Prospectivas del mercado de gas natural 2003 – 2012”. Secretaria de Energía. México, 2003.
 - **Presidencia de la República (2007)**. “Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012”. México, 2007.

Referencias en Internet

- www.windpower.org
- www.idae.es
- www.iie.org.mx
- <http://unfccc.int>
- www.bee-ev.de
- www.erneuerbare-energien.de
- www.energias-renovables.com
- www.appa.es
- www.eia.org
- www.cfe.gob.mx
- www.cinvestav.mx
- www.conae.gob.mx
- www.nrel.gov
- www.oaxacaenergialimpia.com.mx
- www.semarnat.gob.mx
- www.sener.gob.mx
- www.renewables-made-in-germany.com
- www.energiasrenovables.ciemat.es
- www.cener.com/es
- www.lfc.gob.mx
- www.amdee.org
- www.anes.org
- http://cambio_climatico.ine.gob.mx
- www.cre.gob.mx
- <http://sie.energia.gob.mx>
- www.pemex.com
- www.energy.gov
- www.colmex.mx
- www.unesa.es

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

Anexos

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

Anexo III.1 Características del viento

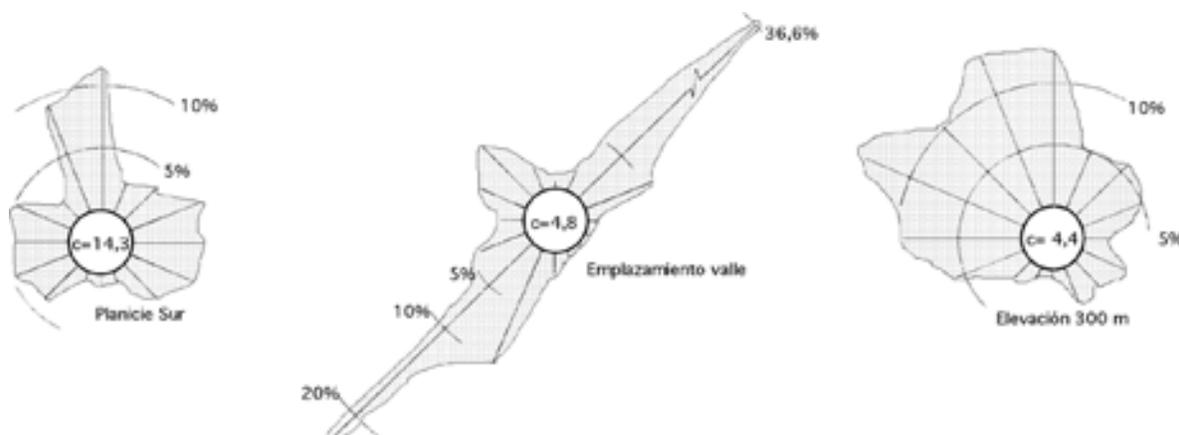
El indicativo para saber si el recurso eólico es potencialmente aprovechable para la generación de electricidad, es la buena caracterización del viento. En esta sección se presentan los aspectos básicos del recurso eólico.

Velocidad y dirección

El viento viene definido por dos parámetros esenciales que son, su dirección y su velocidad. Para realizar la medida de las velocidades del viento se utilizan los anemómetros, en cambio para saber la dirección basta con usar una veleta, que generalmente se coloca a la altura del anemómetro.

A menudo, la distribución de la dirección del viento es presentada mediante la rosa de los vientos, como se muestra en la figura, la cual es una gráfica de la presión y dirección del viento. La rosa de los vientos sólo nos puede representar cantidades tales como la velocidad promedio o el porcentaje de potencia disponible para cada dirección (*NREL, 2006*).

Rosas de viento características para un flujo dominante dentro de un valle, en una planicie sur y por encima de las elevaciones extremas de un valle



Fuente: Díez, 2001

Energía y potencia del viento

Como ya sabemos, el viento es aire en movimiento, y el aire es considerado un fluido, por lo que para obtener la energía del viento se parte de la ecuación de la energía cinética de una masa, donde el término correspondiente a la masa será sustituido por la ecuación que proporciona la masa de un fluido. Entonces, la energía del viento (energía eólica) a través de una sección A (perpendicular a la dirección del viento), durante un tiempo t, que expresado como:

$$e_e = \frac{1}{2} (A \rho_a v_v t) v_v^2 = \frac{1}{2} A \rho_a t v_v^3$$

donde:

ρ_a = Densidad del aire

v_v = Velocidad del viento

La potencia entonces, quedará determinada por la siguiente ecuación:

$$P_e = \frac{e_e}{t} = \frac{1}{2} A \rho_a v_v^3$$

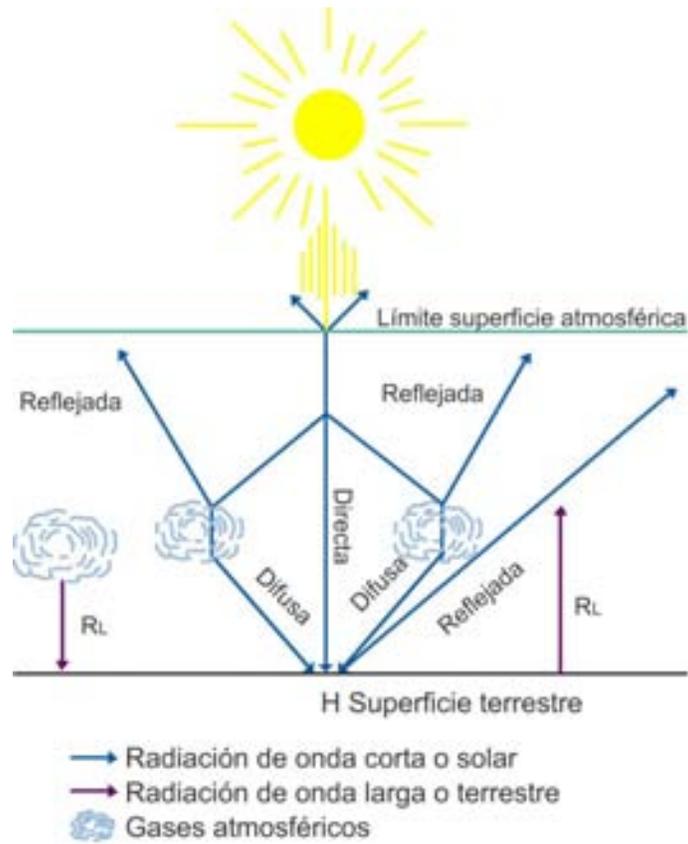
Anexo III. 2 Radiación solar

La radiación incidente sobre un receptor situado fuera de la atmósfera, o radiación extraterrestre, proviene casi exclusivamente de la emitida en línea recta por el Sol (radiación directa). Al atravesar la atmósfera, los componentes atmosféricos actúan sobre la radiación solar en parte reflejándola (nubes), en parte absorbiéndola (ozono, oxígeno, anhídrido carbónico, vapor de agua, etc.) y en parte dispersándola (moléculas, gotas de agua y polvo en suspensión, etc.). Por último, de la radiación que llega al suelo, una parte es absorbida por el propio suelo y otra parte es reflejada de nuevo hacia la atmósfera. El resultado de estos efectos es la descomposición de la radiación solar incidente sobre un receptor en tres componentes, como se observa en la figura:

- Directa. Constituida por los haces de rayos que se reciben en línea recta con el Sol.
- Difusa. Procede de todo el cielo excluyendo el disco solar y debida a los rayos no directos y dispersados por la atmósfera en la dirección del receptor.
- Albedo. Procede del suelo debida a la reflexión de la radiación incidente en él.

La radiación total que incide en una superficie, es la suma de estos tres tipos de radiación y es denominada radiación global.

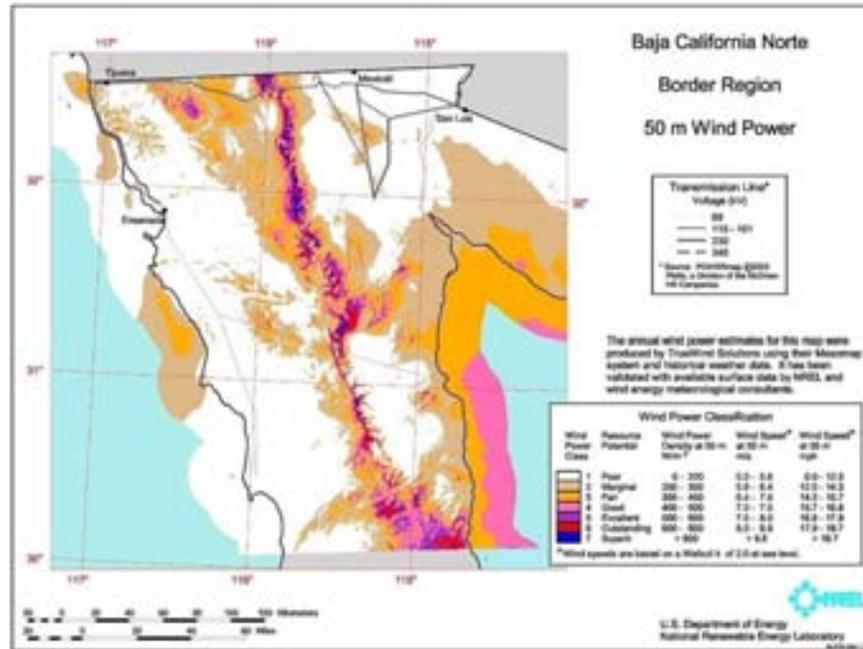
Descomposición de la radiación solar



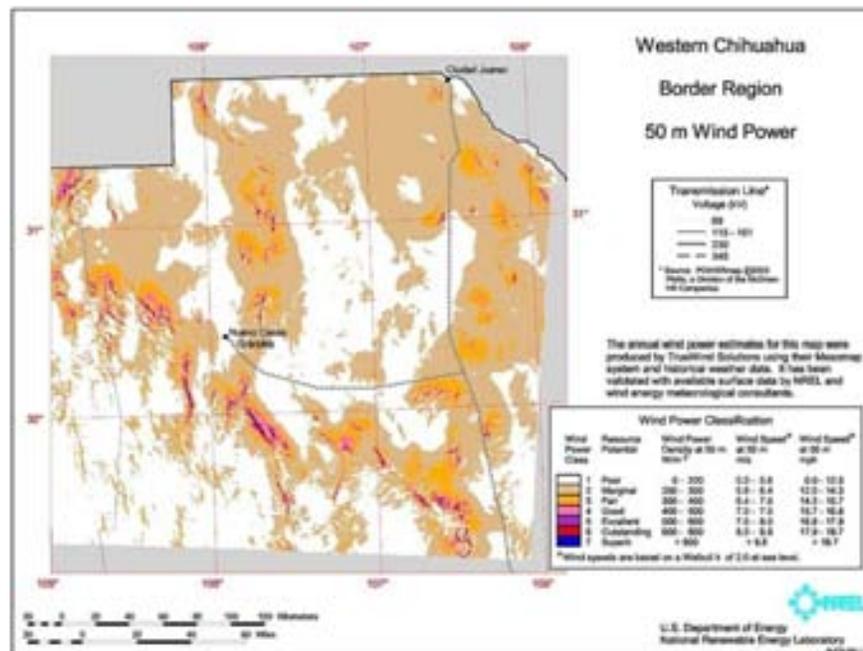
Fuente: UPME, 2005

Anexo III.3 Recurso Eólico en México³⁵

Baja California Norte

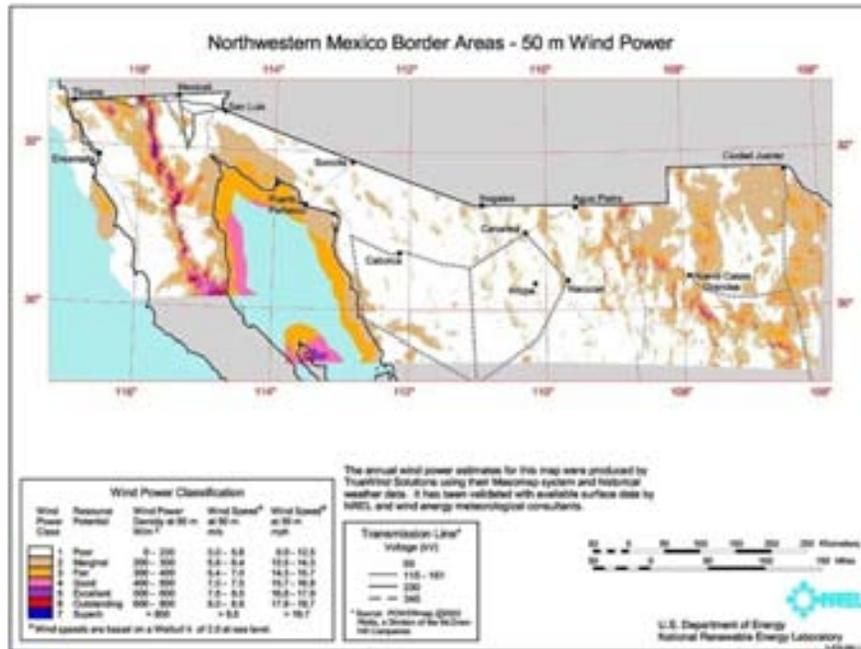


Occidente de Chihuahua

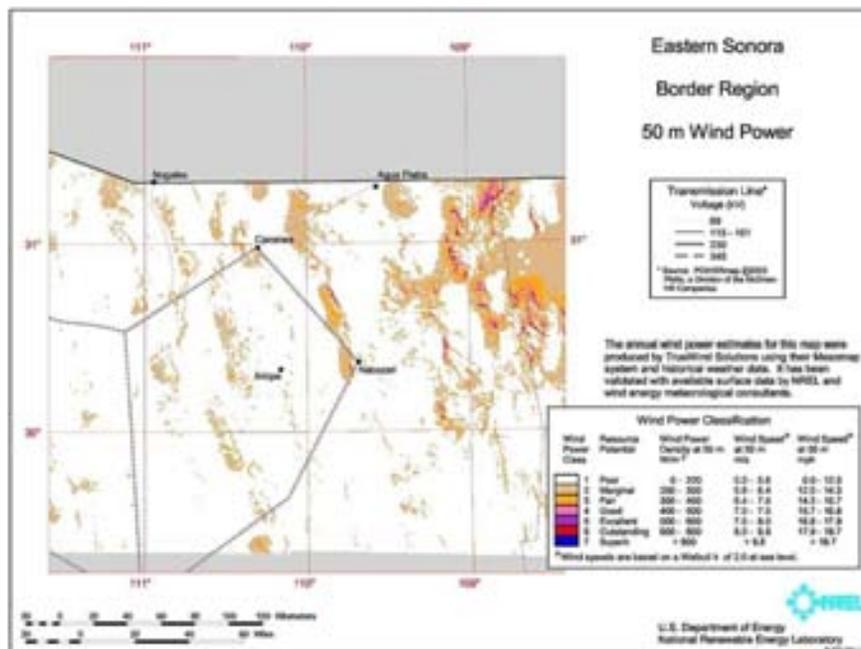


³⁵ Los mapas presentados fueron obtenido de la pagina electrónica de NREL, <http://www.nrel.gov>

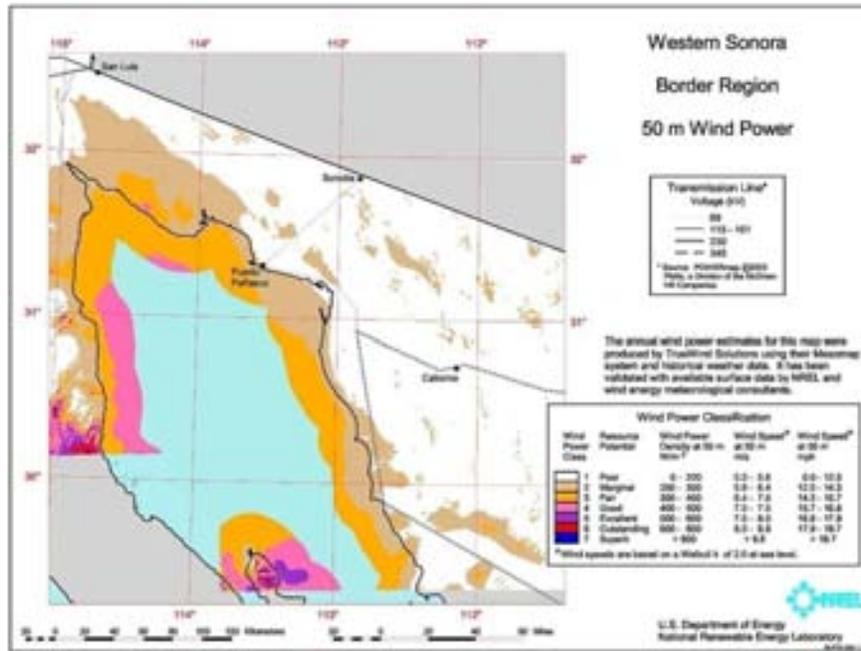
Noroeste de México



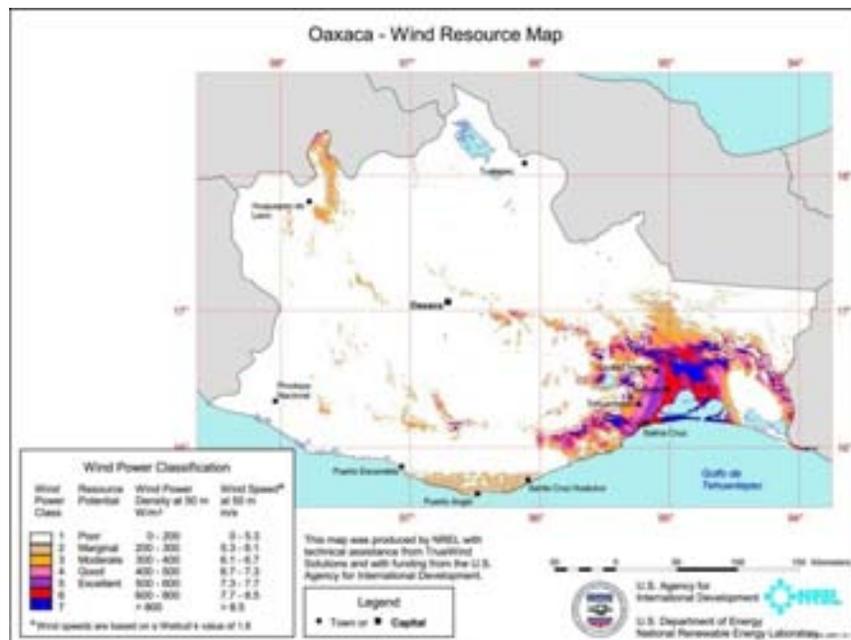
Oriente de Sonora



Occidente de Sonora



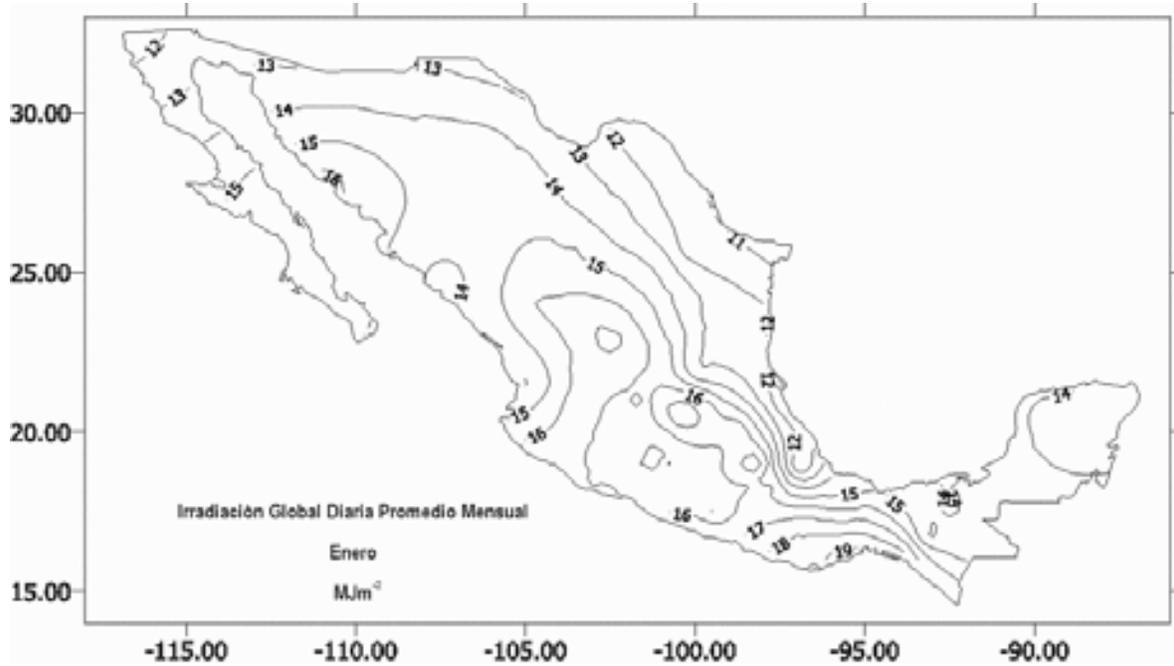
Oaxaca



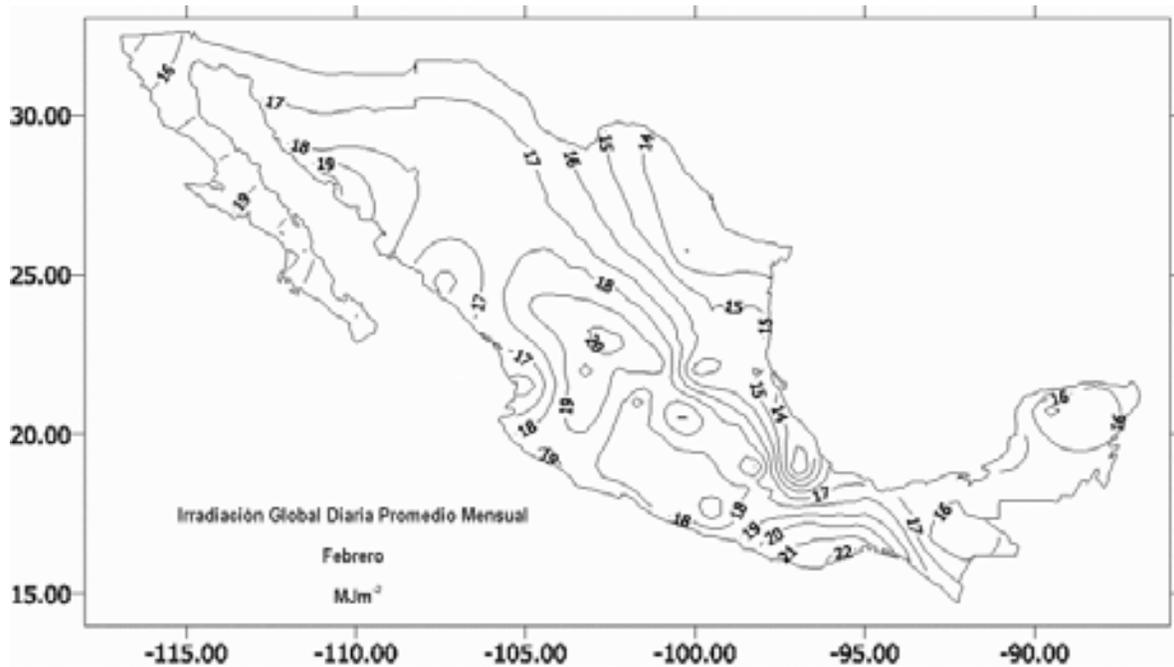
Esta página se dejó en blanco intencionalmente

Anexo III.4 Mapas de isohelias de irradiación global diario promedio mensual³⁶

Irradiación global diaria promedio mensual: Enero

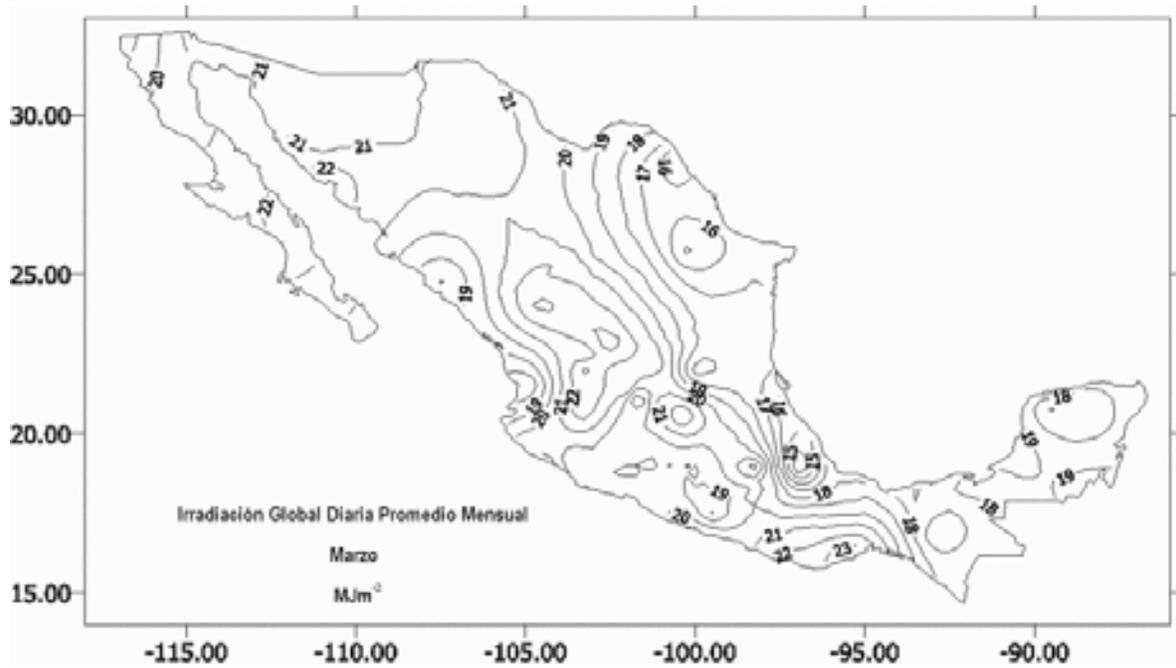


Irradiación global diaria promedio mensual: Febrero

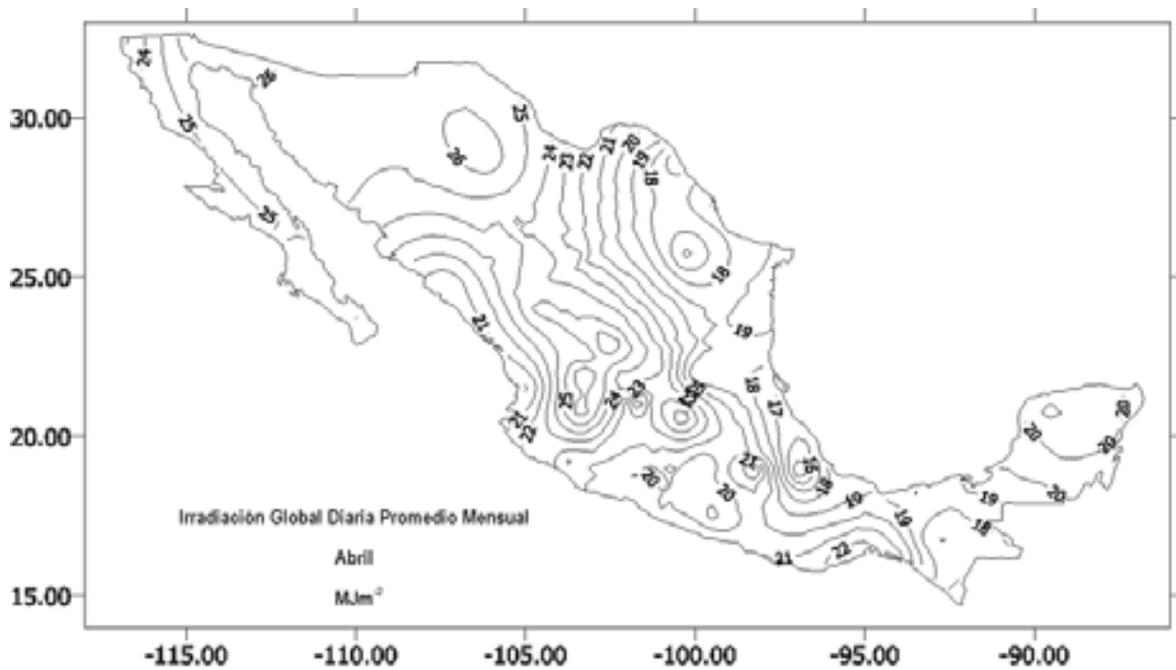


³⁶ Los mapas presentados fueron tomados de la bibliografía II, 2005.

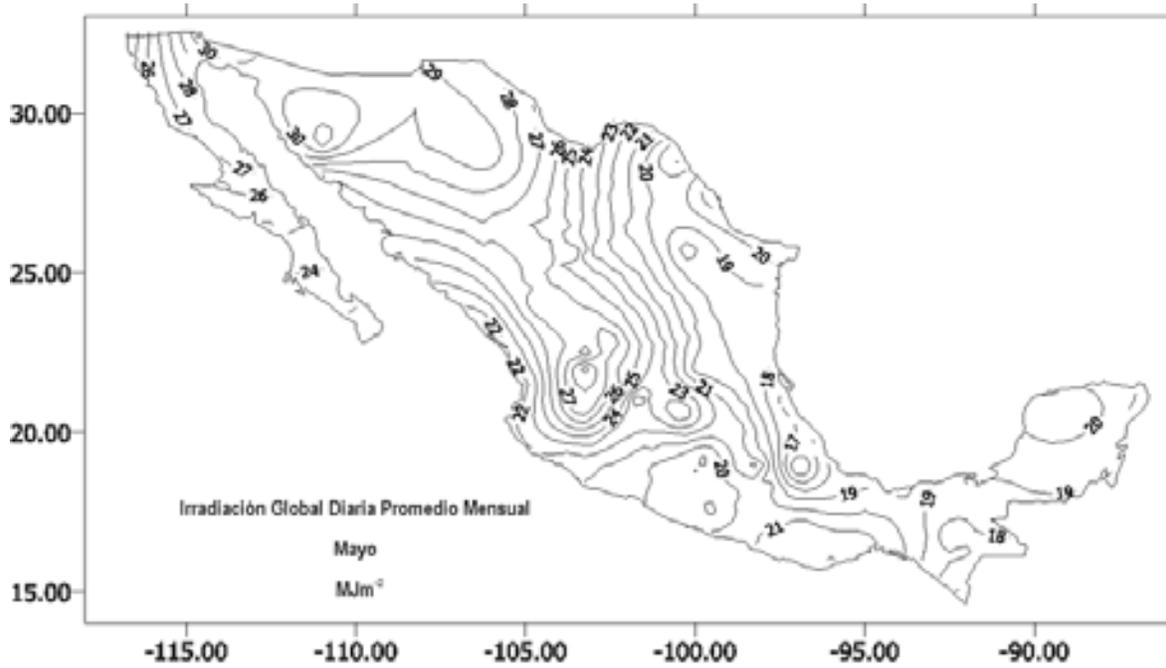
Irradiación global diaria promedio mensual: Marzo



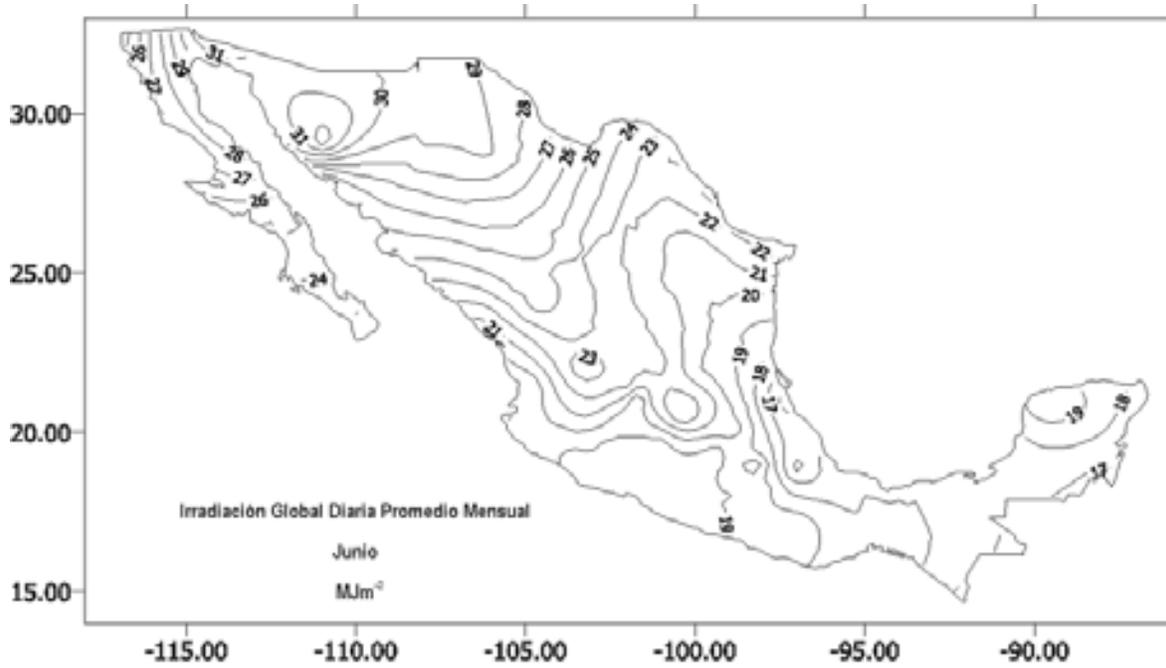
Irradiación global diaria promedio mensual: Abril



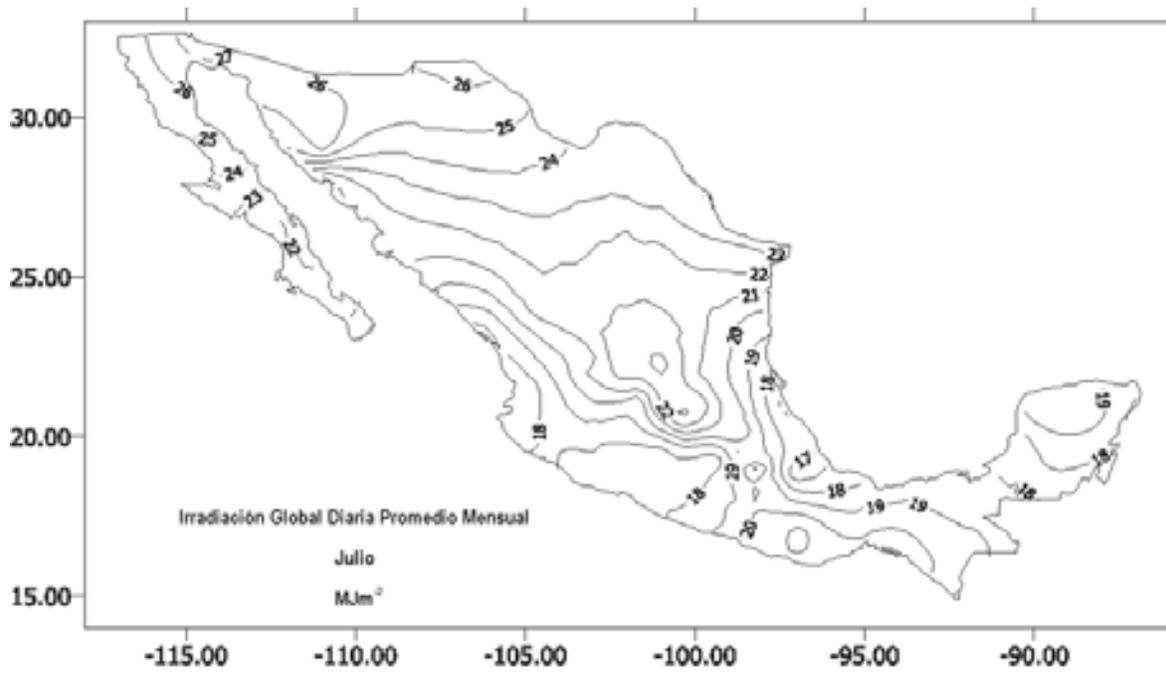
Irradiación global diaria promedio mensual: Mayo



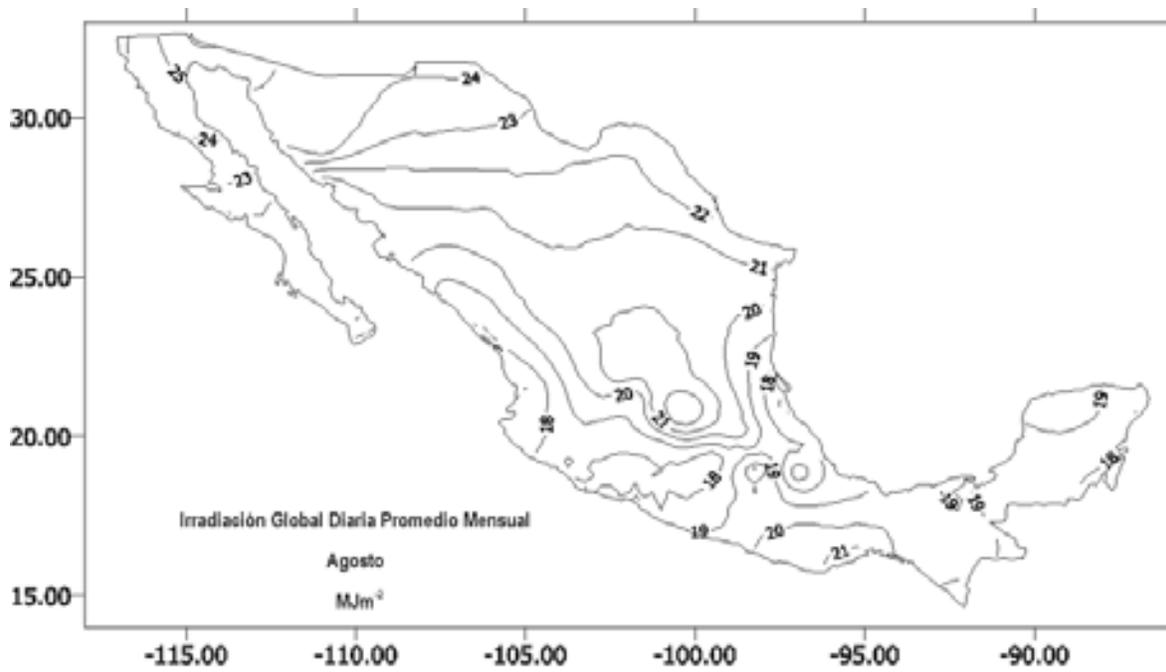
Irradiación global diaria promedio mensual: Junio



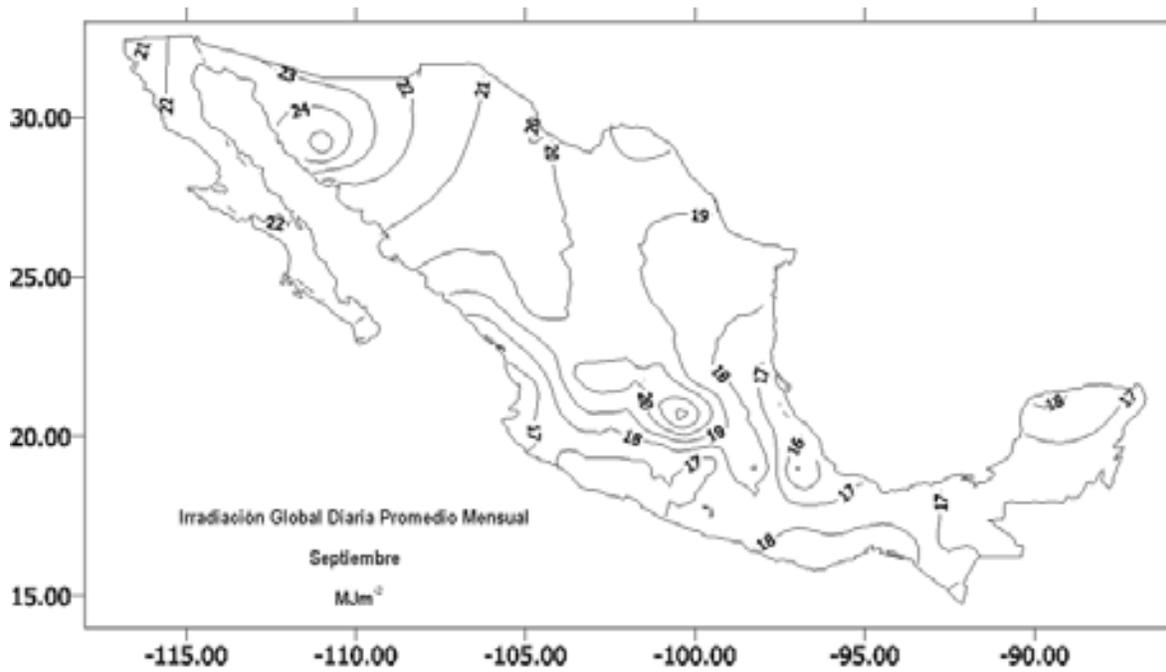
Irradiación global diaria promedio mensual: Julio



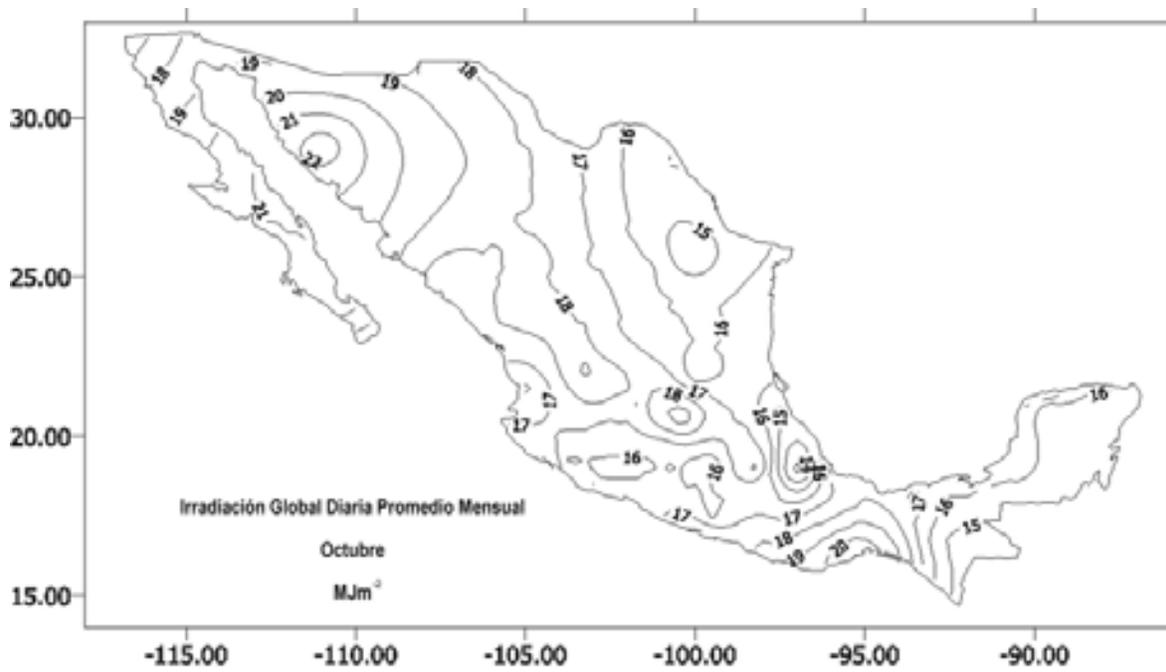
Irradiación global diaria promedio mensual: Agosto



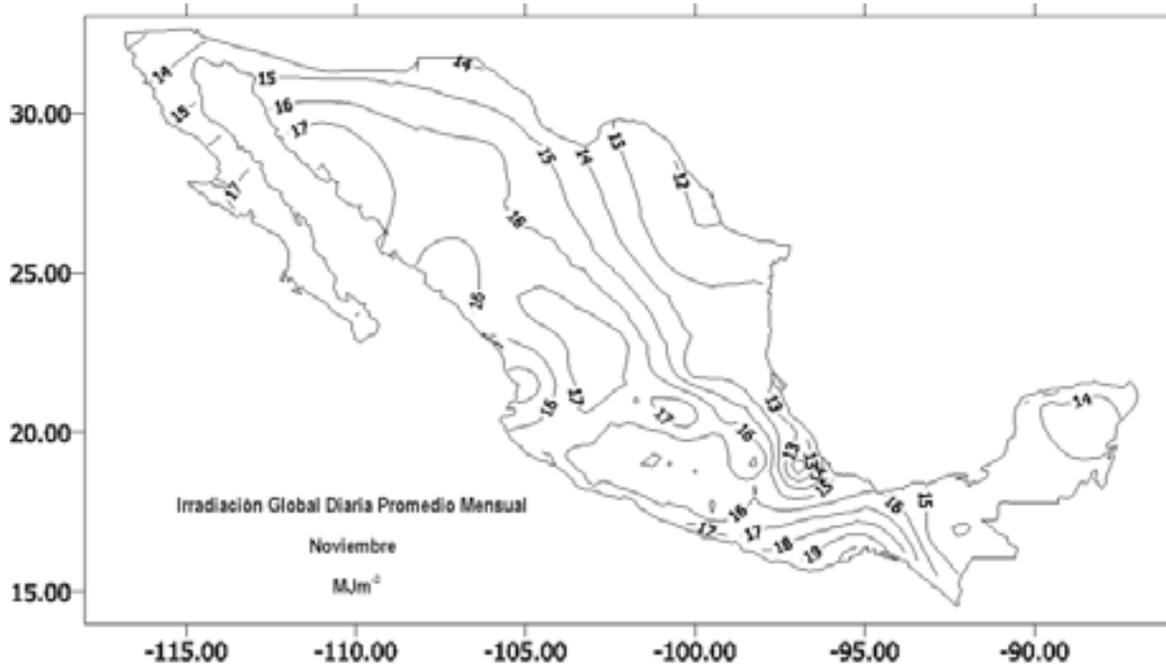
Irradiación global diaria promedio mensual: Septiembre



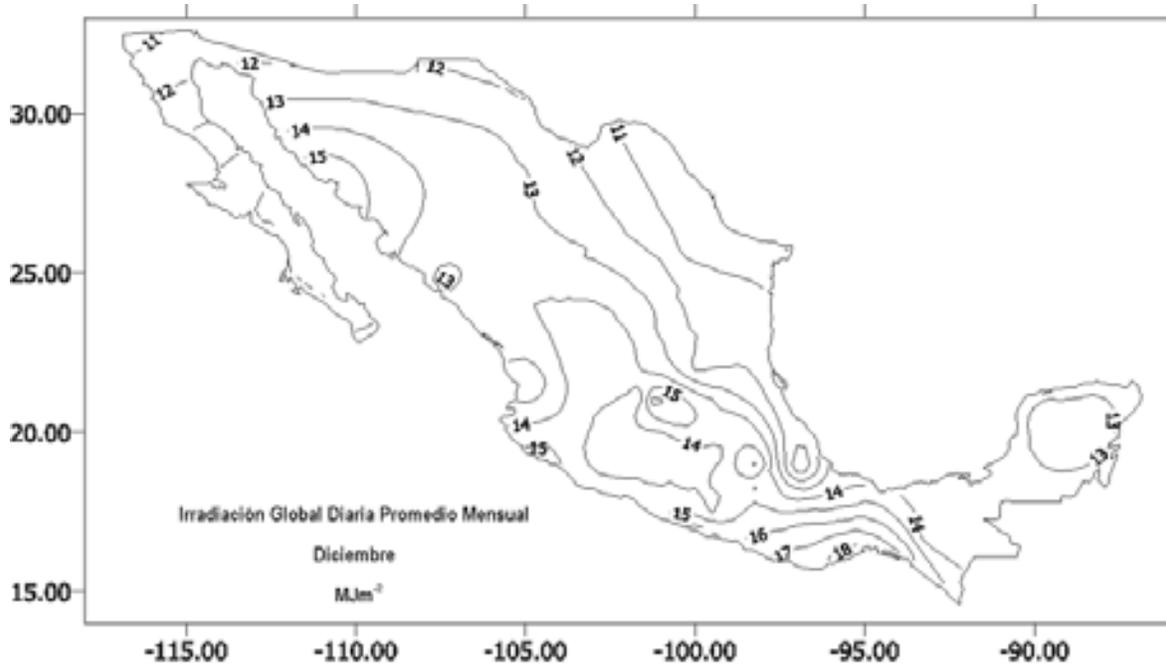
Irradiación global diaria promedio mensual: Octubre



Irradiación global diaria promedio mensual: Noviembre



Irradiación global diaria promedio mensual: Diciembre



Anexo II.5 Localidades con información meteorológica para las que se estimó la radiación solar

Estados y ciudades	Latitud Norte	Longitud Oeste	Estados y ciudades	Latitud Norte	Longitud Oeste
AGUASCALIENTES			MICHOACÁN		
Aguascalientes	21.87°	102.30°	Morelia	19.70°	101.02°
BAJA CALIFORNIA SUR			NAYARIT		
La Paz	24.17°	110.42°	Tepic	21.52°	104.90°
CAMPECHE			NUEVO LEÓN		
Campeche	19.85°	90.48°	Monterrey	25.68°	100.30°
COAHUILA			OAXACA		
Piedras Negras	28.68°	100.57°	Oaxaca	17.07°	96.72°
Saltillo	25.42°	100.98°	Salina Cruz	16.17°	95.18°
COLIMA			PUEBLA		
Colima	19.23°	103.73°	Puebla	19.03°	98.20°
Isla Socorro	18.72°	110.95°	Manzanillo	19.05°	104.33°
CHIAPAS			QUERÉTARO		
Arriaga	16.23°	93.90°	Querétaro	20.60°	100.38°
Comitán	16.25°	92.13°	QUINTANA ROO		
San Cristobal de las Casas	16.75°	92.63°	Cozumel	20.52°	86.95°
Tapachula	14.92°	92.27°	Chetumal	18.50°	88.30°
Tuxtla Gutiérrez	16.75°	93.12°	SAN LUIS POTOSÍ		
CHIHUAHUA			Río Verde	21.93°	99.98°
Chihuahua	28.65°	106.07°	San Luis Potosí	22.15°	100.98°
Distrito Federal			SINALOA		
Aeropuerto	19.43°	99.08°	Culiacán	24.80°	107.40°
Tacubaya	19.40°	99.20°	Mazatlán	23.22°	106.42°
DURANGO			SONORA		
Durango	24.03°	104.67°	Ciudad Obregón	27.48°	109.93°
Hermosillo	29.07°	110.97°	Guaymas	27.92°	110.90°
GUANAJUATO			TAMAULIPAS		
Guanajuato	21.02°	101.25°	Soto la Marina	23.77°	98.22°
León	21.12°	101.68°	Tampico	22.23°	97.85°
GUERRERO			TLAXCALA		
Acapulco	16.83°	99.93°	Tlaxcala	19.32°	98.23°
Chilpancingo	17.55°	99.50°	VERACRUZ		
HIDALGO			Córdoba	18.90°	96.93°
Pachuca	20.13°	98.73°	Jalapa	19.53°	96.92°
Tulancingo	20.08°	98.37°	Orizaba	18.85°	97.10°
JALISCO			Tuxpan	20.95°	97.40°
Colotlán	22.12°	103.27°	Veracruz	19.20°	96.13°
Guadalajara	20.68°	103.38°	YUCATÁN		
Huejúcar	22.37°	103.22°	Mérida	20.93°	89.63°
Lagos de Moreno	21.35°	101.92°	Progreso	21.28°	89.65°
ESTADO DE MÉXICO			Valladolid	20.68°	88.22°
Chapingo	19.48°	98.88°	ZACATECAS		
Toluca	19.30°	99.67°	La Bufa	22.78°	102.58°

Fuente:II, 2005