

# INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE LA ENERGÍA EÓLICA EN MÉXICO



**ANES**

**Enrique Caldera Muñoz**

**2006 Asociación Nacional de Energía Solar  
México, D.F.**

# INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE LA ENERGÍA EÓLICA EN MÉXICO

**Enrique Caldera Muñoz**

**PRÓLOGO**

*Eduardo A. Rincón Mejía*



© 2006 Asociación Nacional de Energía Solar  
México, D. F.  
ISBN 968-5219-06-0



**ANES**

## **Asociación Nacional de Energía Solar A. C.**

### **Presentación**

Este libro fue propuesto al empezar la gestión del XIII Consejo Directivo, como parte de sus tareas estratégicas. La intención era editar un libro conmemorativo de los 30 años desde que un grupo de profesionales y personas interesadas en la Energía Solar iniciaron la realización anual de la Semana Nacional de Energía Solar, así como una serie de libros temáticos que difundieran los avances en el desarrollo realizado por parte de los investigadores, estudiantes y académicos que trabajan en el campo de las fuentes renovables de energía en México.

Pronto fue aceptada la propuesta por el Consejo Directivo y se puso así “manos a la obra”. El presente, representa el libro relacionado al tema de la Investigación y Desarrollo de la Energía Eólica en México.

Agradecemos al autor que ha hecho este gran esfuerzo, a todos los miembros del actual Consejo Directivo de ANES, y a todos los colegas y amigos que contribuyeron a convertir en realidad este libro. Deseamos que los lectores disfruten, y que, a través de su lectura, conozcan más sobre los esfuerzos realizados en nuestro país para generar energía eléctrica a partir de la energía llevada por el viento.

**Dr. David Morillón Gálvez**  
Presidente del XIII Consejo Directivo de ANES

**Dr. Arturo Morales Acevedo**  
Editor

# XIII CONSEJO DIRECTIVO DE LA ANES

**Dr. David Morillón Gálvez**

Presidente

**Ing. Rodolfo Martínez Strevel**

Vicepresidente

**Mtro. Odón de Buen Rodríguez**

Secretario

**Dr. Arturo Fernández Madrigal**

Tesorero

**Dr. Arturo Morales Acevedo y Dr. Juan José Ambriz García**

Presidentes del Comité Editorial

**Dr. Álvaro Lentz Herrera**

Secretario de Organización

**Ing. Ricardo Saldaña Flores**

Secretario de Planeación

**Ing. David Mekler**

Secretario de Asuntos Industriales

**Mtro. Ricardo Gallegos**

Secretario de Secciones Regionales

**Ing. Enrique Caldera Muñoz**

Secretario de Política y Legislación

**Dr. Manuel Rodríguez Viqueira**

Secretario de Publicaciones

**Mtro. Norberto Chargoy del Valle**

Secretario de Vocalías

**Ing. Eduardo A. Rincón Mejía**

Representante de ANES ante el BOD de ISES

**Dr. Enrique Geffroy**

Secretario de Asuntos Internacionales

**Dr. Hernando Romero-Paredes**

Secretario de Capacitación

**Sr. José Celis Alarcón**

Secretario de Acción Estudiantil

## VOCALÍAS

**Mtra. María Corral Martínez**

Arquitectura Bioclimática

**Ing. Carlos García Aguilar**

Energía Eólica

**Dr. Omar Masera Cerutti**

Bioenergía

**Dr. Rafael E. Cabanillas**

Concentración Solar

**Dr. Aarón Sánchez Juárez**

Fotovoltaicos

**Dr. Nicolás Velásquez Limón**

Refrigeración Solar

**Dr. Agustín Muhlia Velázquez**

Evaluación del Recurso Solar

**Dra. Ernestina Torres Reyes**

Secado Solar

**Dr. Víctor M. García Saldívar**

Materiales Solares

**Dr. Ulises Cano Castillo**

Hidrógeno

**C. Dr. Juan Jorge Hermosillo Villalobos**

Desalinización y Potabilización Solar

**Dr. Adalberto Tejeda M.**

Cambio Climático y Energías Renovables

## SECCIONES REGIONALES

**Dra. Ramona Alicia Romero**

Baja California

**Ing. Eberhard Wolf Krautter**

Baja California Sur

**Dr. Leandro Sandoval**

Colima

**Mtro. Arturo Mérida Mancilla**

Chiapas

**Dr. Ignacio Martín Domínguez**

Chihuahua

**Dra. Ernestina Torres Reyes**

Guanajuato

**C. Dr. Eduardo Velasco Oroasco**

Estado de México

**Dr. José Antonio Gómez Reyna**

Jalisco

**Ing. Ricardo Saldaña Flores**

Morelos

**Dra. Ana Rosa Velasco Ávalos**

Michoacán

**Ing. Carlos García Aguilar**

Oaxaca

**Ing. Alejandro Franco Pérez**

Querétaro

**Mtro. Inocente Bojórquez Báez**

Quintana Roo

**Ing. Luis Gómez de Ibarra**

San Luis Potosí

**Ing. Hildeberto Hernández Frías**

Sinaloa

**Dr. Juan Manuel Ochoa de la Torre**

Sonora

**Ing. Samuel Heladio Durán**

Tamaulipas

**Ing. Miguel González Petit-Jean**

Veracruz

**Dr. Víctor M. García Saldívar**

Zacatecas

# Í N D I C E

|  |           |
|--|-----------|
| <b>PRÓLOGO</b>   | <b>2</b>  |
| <b>CAPÍTULO 1. VISIÓN GENERAL DE LA ENERGÍA<br/>EÓLICA EN MÉXICO</b>                                   | <b>5</b>  |
| <b>CAPÍTULO 2. INVESTIGACIÓN BÁSICA SOBRE<br/>ENERGÍA EÓLICA EN MÉXICO</b>                             | <b>10</b> |
| <b>CAPÍTULO 3. DESARROLLOS TECNOLÓGICOS EN MÉXICO<br/>PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA EÓLICA</b> | <b>43</b> |
| <b>CAPÍTULO 4. APLICACIONES IMPORTANTES E IMPACTOS<br/>POTENCIALES DE LA ENERGÍA EÓLICA EN MÉXICO</b>  | <b>58</b> |
| <b>CAPÍTULO 5. PERSPECTIVAS DE DESARROLLO DE<br/>LA ENERGÍA EÓLICA EN MÉXICO</b>                       | <b>72</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>  | <b>96</b> |

## PRÓLOGO

México cuenta con muy vastos recursos energéticos renovables, como la radiación que recibe del Sol, que a su vez origina el viento, la lluvia, el crecimiento de las plantas verdes... Con estos recursos limpios es posible satisfacer todas las necesidades energéticas de su población durante generaciones, sin dañar al ambiente y con una completa garantía de suministro. El Sol sale para todos, su luz y radiación son gratuitas, y su aprovechamiento puede dar trabajo digno a decenas de millares de personas, con una buena calidad de vida para todos. De hecho, un Desarrollo Sustentable– términos que aparecen en nuestra Carta Magna, y en toda la legislación estatal y municipal- podría alcanzarse únicamente si éste se basa en las fuentes renovables de energía, hasta donde el conocimiento actual nos permite elucidar.

Hoy por hoy, la manera más segura y económica de generar electricidad a gran escala empleando fuentes renovables es con centrales eólicas, que comienzan a aventajar a las plantas hidroeléctricas, sobre todo porque podemos imaginar a nuestra atmósfera como un gran océano aéreo, presente en cualquier sitio sobre la Tierra, a diferencia de los escurrimientos hídricos. Sin embargo, el sistema energético de un gran país como México, requiere del uso combinado de diversas fuentes renovables de energía, en donde la intermitencia –predecible casi por completo- de la energía solar, y la del viento –también estadísticamente manejable- será soslayada por el efecto sinérgico, basado en el principio de que “el todo es mucho más que la suma de las partes”, obtenido al emplear simultáneamente varias fuentes renovables de energía.

Las alteraciones climáticas, pero sobre todo el alza incontenible de los precios internacionales del petróleo y el gas natural, han vuelto a poner a las fuentes renovables de energía como la alternativa energética a utilizar para la supervivencia de nuestra civilización, al menos ésta es la visión en los países avanzados como Suecia, que ha anunciado recientemente que se liberará por completo de los combustibles fósiles y nucleares, y su sistema energético estará alimentado por fuentes renovables en el corto plazo.

Sin embargo, como nos refiere Don Enrique Caldera, autor del presente libro, “Cuando en el resto del mundo las energías renovables, la generación distribuida y la administración de la demanda, se empiezan a utilizar como las herramientas básicas para la reestructuración del Sector Eléctrico a largo plazo, en un esquema de desarrollo sustentable que empieza a articularse, México sigue anclado en una visión convencional para el crecimiento de la oferta eléctrica”.

En su excelente libro, que se vuelve una referencia obligada para todos los interesados en saber acerca de las fuentes renovables de energía: científicos, ingenieros, políticos, estudiantes de todos los niveles y público en general, nos explica las sinrazones del por qué de nuestro atraso, pero sobre todo, nos explica de manera muy lúcida, cómo podemos salir de éste y alcanzar al menos 5 mil MW eoloeléctricos instalados para el año 2012, crecer a más de 10 mil MW para el 2017, y rebasar los 40 mil para el año 2030, cuando la población de nuestro país se espera que roce los 130 millones de paisanos.

De alcanzarse, esta capacidad instalada -40 mil MW- sería apenas el 5% del potencial eólico aprovechable, el cual a su vez es una pequeña fracción del potencial disponible, estimado por Don Enrique en más de un millón de megavatios.

El recurso eólico es inmenso, de modo que las palabras de nuestros funcionarios cuando se refieren a cinco mil megavatios de capacidad como potencial aprovechable en el largo plazo, nos enternecen casi hasta las lágrimas y nos hacen pensar que se equivocan lastimosamente por dos órdenes de magnitud.

En su libro, Enrique Caldera despedaza los mitos de la intermitencia, la carencia de capacidad firme, los altos costes de instalación, y demás argumentos falaces que han impedido el desarrollo de las fuentes renovables de energía, en particular la eólica, y concluye magistralmente afirmando que el desafío que consiste en duplicar el consumo energético per cápita en nuestro país –requisito ineludible para salir del subdesarrollo, Caldera *dixit* - sólo puede enfrentarse: “no con un sistema centralizado, sino en forma distribuida; no con la preponderancia de alguna fuente primaria, sino con la participación de todos los energéticos disponibles y viables, así como la inclusión de una gran variedad de tecnologías y tamaños de procesos de conversión de electricidad. Esto requiere desde

modificaciones al marco legal de la industria, como la reestructuración interna de CFE, la adecuación de la CRE, etcétera.

Las adecuaciones legales no pasan por la Constitución, sino por la adecuación de las leyes secundarias que debe adaptarse, dentro del espíritu de la Constitución, a las nuevas realidades tecnológicas y de fuentes primarias de energía, en un contexto de urgencia por la transformación del sector energético en general y el eléctrico en particular”.

Ha sido un placer y un honor para mí el haber escrito estas líneas a manera de prólogo para el libro del Ing. Enrique Caldera Muñoz, indiscutible decano de la energía eólica, no sólo de México sino de países como Cuba, en donde es públicamente reconocido por los colegas antillanos como el “Padre de la Energía Eólica de la Gran Isla”.

Eduardo A. Rincón Mejía  
Verano de 2006



# CAPÍTULO 1

## VISIÓN GENERAL DE LA ENERGÍA EÓLICA EN MÉXICO

El mundo atraviesa por una grave crisis ambiental. El deterioro de suelos, agua y aire, se ha convertido en una amenaza real sobre la supervivencia de la fracción más desamparada de la especie humana, así como de destrucción parcial de la infraestructura física y económica, de buena parte del resto de los humanos. A nivel de países, enfrentamos circunstancias que amenazan la seguridad nacional. El efecto inmediato que la contaminación atmosférica está causando a nivel mundial es el caos climático presente, como consecuencia directa del desbalance de la fisicoquímica atmosférica de incrementar el efecto invernadero natural en nuestra atmósfera. El haber incrementado ese efecto ha significado un "calentamiento" de la misma que se traduce en procesos energéticos más intensos, en todos los fenómenos climatológicos.

La atmósfera de este planeta fue creada por la vida. La composición química de nuestro aire la formó la naturaleza a través del proceso de la evolución biológica. Pero no sólo cambió su composición química, sino también su mecánica climatológica. La biosfera terrestre es apta para la vida fundamentalmente por su estabilidad climática. Nosotros estamos rompiendo ese equilibrio. Nuestro consumo de combustibles de origen fósil: carbón, gas natural y petróleo, está agregando a nuestra atmósfera más de seis mil millones de toneladas anuales de carbono, en forma de CO<sub>2</sub>, cuyo incremento cotidiano espesa el velo que retiene el calor en la Tierra.

A la biosfera de la Tierra le tomó millones de años capturar el CO<sub>2</sub> atmosférico a través de las plantas, y en procesos geológicos integrarlo al suelo, donde se fosilizó como carbón, gas o petróleo. Lo que la naturaleza hizo en eones, lo estamos deshaciendo en décadas. Tenemos siglo y medio explotando carbón industrialmente, y apenas uno de extraer petróleo. Hemos cambiado la faz de Tierra, el progreso técnico que hemos logrado se debe al uso intensivo y masivo de energía, pero el deterioro ambiental ha sido la otra cara de la moneda. Hoy se habla del desarrollo sustentable, un desarrollo que no comprometa ni el medio ambiente ni los recursos naturales con los que habrán de vivir nuestros nietos, sus hijos y sus nietos.

Afectar el ambiente sin impactos acumulativos y hacer uso de recursos naturales sin depredarlos, implica una cultura ecológica del desarrollo, donde los recursos renovables y el reciclaje son las piedras fundamentales. Son los usos y costumbres del actual sistema energético mundial, basado en combustibles fósiles, los principales responsables, tanto de la polución atmosférica en las grandes urbes, como del cambio climático a nivel mundial. Serán las fuentes renovables de energía, con los que se producirán combustibles limpios como el hidrógeno, los alcoholes y otros biocombustibles, los soportes energéticos de un mundo donde el hombre convivirá con la naturaleza, sin depredarla ni tratar de dominarla, simplemente coexistiendo en armonía.

En México, las autoridades energéticas han menospreciado durante los últimos treinta años el recurso energético eólico, dándole la espalda a una forma de energía renovable, que carece de emisiones a la atmósfera, que no contamina ni el suelo ni el agua, ni requiere de grandes cantidades de agua para los sistemas de enfriamiento, cuyo impacto visual es mucho más amable que una central termoeléctrica a combustóleo o carbón, y su ruido se limita a un siseo que solo se escucha en las inmediaciones de los aerogeneradores. Caminando entre las torres de una central eoloeléctrica en California lo que generalmente se escucha es el zumbido del viento contra la vegetación y el trino de los pájaros, y si se tiene suerte como yo la tuve, toparse con una familia de venados que pastaban junto a las torres. Un técnico de la central me comentó que en ocasiones han podido ver osos o pumas merodeando por ella.

Una central eoloeléctrica paga por empleos no por combustibles, usa un recurso local donde este existe y requiere de un porcentaje importante de integración nacional y local para ser rentable y constituye en la actualidad la forma más económica de generar electricidad en gran escala, si consideramos los costos directos e indirectos, económicos, sociales y ambientales relacionados con la producción de energía eléctrica, es decir, desde el punto de vista de la sustentabilidad. Es junto con las hidroeléctricas y posteriormente con la generación eléctrica fotovoltaica, la base de la transición a la utilización del hidrógeno como el combustible avanzado del futuro, de un futuro que necesitamos empezar a forjar desde ya.

¿Porqué entonces la reticencia de las empresas eléctricas a su aprovechamiento masivo?

Hay varios motivos de orden técnico y político. En el orden técnico el principal motivo es que la energía eólica no es "despachable", esto significa que la potencia que entrega la central no puede ser regulada por el operador de la misma, y por tanto no la puede ajustar a los requerimientos del Sistema Eléctrico en ese momento. La potencia entregada obedece a un patrón de comportamiento según la naturaleza de los vientos en el sitio e influencias sinópticas de fenómenos meteorológicos en gran escala; frentes fríos, tormentas tropicales o ciclones, etcétera, por tanto, el suministro eléctrico obedece a un patrón estadístico típico del sitio, con algunas desviaciones dentro de su comportamiento general.

Sin embargo, el aprovechamiento de la energía eólica para generación eléctrica, no se puede contemplar de la manera convencional, instalando grandes centrales eolieléctricas, sino bajo el concepto de *generación distribuida*, donde minicentrales eólicas ampliamente distribuidas en una región, aportan energía no de una forma intermitente, sino de manera **previsible** al corresponder al patrón de vientos regionales. La generación distribuida, corresponde a *cargas negativas*, cuyo efecto estadístico es alterar la curva de demanda de la región, sobre la cual ahora, se planea el despacho de carga. La solución a la variabilidad del viento en un sitio, es la integración masiva, distribuida, de aerogeneradores, que compensan mutuamente esa variabilidad.

El otro motivo principal es de tipo político. Las empresas eléctricas han funcionado como monopolios territoriales a nivel nacional o regional para la prestación del servicio, cubriendo las etapas de generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica, desde un poder central con definitiva influencia sobre el territorio en el que opera. Y la forma tradicional de enfocar el problema del crecimiento continuo de la demanda y el consumo eléctrico ha sido convencionalmente hacer centrales cada vez más grandes. Para grandes necesidades, macrosoluciones. Esta filosofía, básicamente economicista, es la causa fundamental de la depredación de los recursos naturales y el daño catastrófico que le estamos infligiendo al ambiente.

La reconversión del sector eléctrico dentro del sistema energético de un país, va de las soluciones macro a las micro, de los sistemas centralizados a los distribuidos, del monopolio a una estructura de responsabilidades compartidas donde participan los propios usuarios, el sector social y el paraestatal, donde si bien se centraliza la operación del sistema y el control

de las líneas de transmisión, a través de la generación distribuida los consumidores se convierten también en productores en pequeña escala, subsanando el problema financiero básico de las grandes empresas eléctricas, que es la escasez de recursos financieros para realizar las masivas inversiones en las grandes centrales eléctricas.

La generación eoloelectrica se aviene perfectamente a esta nueva estructura del sistema eléctrico. Su carácter modular permite interconectar a la red desde un sólo aerogenerador de mediana capacidad, de 50 a 500 kW, en una granja o ranchito, hasta una central eoloelectrica de 100 MW que se puede considerar muy grande, que por un lado puede crecer por etapas, iniciando la aportación eléctrica a los cuatro meses de iniciada su construcción, con las primeras máquinas montadas e interconectadas, y por el otro, puede financiarse también por etapas y desde distintas fuentes, creciendo según la disponibilidad de recursos.

La generación eléctrica distribuida de pequeña escala, tiene la ventaja adicional para las actividades agropecuarias, de que los campos de cultivo o de pastoreo con condiciones eólicas apropiadas, pueden ser una fuente adicional de riqueza, al explotar otro recurso natural presente y autoabastecerse o incluso "vender" energía a la empresa eléctrica prestadora del servicio. Estos pequeños paquetes de energía eléctrica que los consumidores tradicionales en adelante transferirán a las empresas eléctricas de manera masiva, tendrán el efecto agregado de modificar el patrón de demanda típico que tiene esa región del sistema eléctrico. De esta manera, al patrón estadístico del consumo se resta el patrón estadístico de oferta por los vientos regionales, presentándose un nuevo patrón resultante contra el cual ajustar el despacho de carga, es decir, la generación agregada de las grandes centrales.

La administración de la demanda, que básicamente consiste en controlar el horario de uso de algunas cargas y la generación distribuida, deberán tener el efecto final de disminuir los picos de demanda eléctrica y mejorar el factor de planta de las grandes centrales, aprovechar mejor los combustibles en la industria y los servicios vía la cogeneración, que constituye la forma más obvia de generación distribuida y participación del sector privado en la generación eléctrica. La tendencia general del Sector Eléctrico a nivel mundial es a su diversificación, en energéticos, tecnologías de conversión, escalas en la generación y formas sociales de producción e intercambio de la energía eléctrica generada.

El problema con las empresas eléctricas tradicionales, y CFE es una de ellas, es que pretenden abordar el futuro con la mentalidad del pasado. Desde la perspectiva convencional una gran central eólica tiene muchas desventajas, pero vista desde una perspectiva moderna, es decir, asumiendo la participación masiva de los consumidores tradicionales, también como autoabastecedores con posible traspaso de excedentes a la empresa eléctrica, la conversión eoloeléctrica se manifiesta como uno de los pilares fundamentales de la generación eléctrica en un escenario post combustibles fósiles.

En términos de desarrollo socioeconómico, nuestro sistema eléctrico tiene 55 años de atraso. El consumo eléctrico per cápita en el México del año 2005 es semejante al consumo per cápita en los EUA al iniciar la guerra de Corea en 1950, un consumo del orden de 2 mil kWh/hab-año. En la actualidad, el consumo per cápita en los EUA es superior a los 13 mil kWh/hab-año. Para lograr en México un consumo de 4 mil kWh/hab-año, del orden del promedio en Europa y Japón al inicio de los años 70, se requiere de una capacidad instalada de generación eléctrica de un kW por cabeza.

Si la población de México se estabilizara en el orden de los 125 a 130 millones a mediados del siglo, la capacidad instalada de nuestro sistema eléctrico nacional deberá ser al menos del orden de los 125 a 130 mil MW, si queremos dejar de ser “tercermundistas”.

Este nivel de capacidad instalada total del Sistema Eléctrico Nacional a mediados del siglo, implica tener desde ahora una visión de los escenarios posibles de desarrollo en un contexto de desarrollo sustentable, entendido como respuestas sin impactos ambientales acumulativos, y fundamentado en recursos renovables. Para el sector eléctrico esto significa energía hidroeléctrica, eólica, solar, combustibles sintéticos de biomasa e hidrógeno. El gas natural será el energético de la transición entre los fósiles pesados: petróleo y carbón, y una economía energética basada en las fuentes renovables de energía. Bajo esta visión, la capacidad eoloeléctrica instalada para esas fechas deberá estar ser del orden de los 50 mil MW, capacidad que el recurso eólico del país puede sustentar holgadamente.

## **CAPÍTULO 2**

### **INVESTIGACIÓN BÁSICA SOBRE ENERGÍA EÓLICA EN MÉXICO**

#### **2.1 El IIE y su Programa de Aprovechamiento Eoloenergético**

##### **2.1.1 Líneas de investigación y desarrollo**

Los trabajos de Investigación y Desarrollo sobre Energía Eólica en el IIE se remontan a febrero de 1977, al iniciarse el Proyecto de Infraestructura "Aprovechamiento de la Energía Eólica", a raíz de ceder la CFE al IIE la Estación Experimental Eólica de El Gavillero, en el municipio de Huichapan, Hidalgo. Los trabajos inicialmente desarrollados, lo fueron en apoyo del proyecto "Sistemas Energéticos Integrados para Comunidades Rurales", contratado ese mismo año con la Gerencia de Electrificación Rural de CFE. Aun cuando el enfoque inicial estaba orientado al desarrollo de Sistemas Conversores de Energía Eólica (SCEE) de pequeña capacidad y para el bombeo de agua y generación eléctrica en aplicaciones aisladas en el medio rural, la perspectiva general se contempló como una línea de desarrollo multiobjetivo y multidisciplinaria, que para 1981 estaba estructurada en cuatro áreas: Meteorología Eólica, Instrumentación Electrónica, Análisis de Aplicaciones y Sistemas, y Desarrollo de Sistemas Conversores de Energía Eólica.

En el contexto del Sector Eléctrico y con una visión de largo plazo, las metas y objetivos fijados a las áreas desde 1978 en un plan indicativo fueron:

##### **Meteorología Eólica**

Meta Global:

- \*Evaluación y caracterización del recurso energético eólico en México
- \* Inventario Nacional de Sitios con Potencial Eólico

Objetivos Específicos:

- \* Desarrollo de metodologías de prospección, medición, procesamiento y análisis de datos, con el propósito de minimizar los requerimientos de instrumentación y del

periodo de observación, para caracterizar y evaluar energéticamente el viento, en los sitios de estudio

- \* Desarrollo de un programa gradual, por etapas, de cobertura nacional, con el apoyo de las instituciones de educación superior, para compilar un catalogo de sitios ventosos y el inventario nacional de sitios con potencial eólico cuantificado para centrales eoloeléctricas

### **Instrumentación Electrónica**

Meta Global:

- \* Desarrollo de Sistemas de adquisición y proceso de datos meteorológicos
- \* Desarrollo de sistemas de control, pruebas y diagnóstico de SCEE

Objetivos Específicos:

- \* Anemocinemógrafos electrónicos con registro en memorias de estado sólido
- \* Observatorio meteorológico electrónico automático a ser interrogado vía telefónica
- \* Controles para la supervisión de aerogeneradores de mediana capacidad

### **Análisis de Aplicaciones y Sistemas**

Meta Global:

- \* Estudios de aplicaciones, sistemas y mercados, relativos a bombeo de agua y generación eléctrica en pequeña y gran escala

Objetivos Específicos:

- \* Micro generación eléctrica
- \* Generación de Potencia, en sistemas aislados e interconectados al Sistema Eléctrico
- \* Bombeo de agua para uso doméstico y de abrevaderos, irrigación y drenaje agrícola y sistemas de agua potable para comunidades

## **Desarrollo de Sistemas Conversores de Energía Eólica**

Meta Global:

\*Desarrollo de SCEE adecuados a usos y aplicaciones en México, de acuerdo a la climatología eólica del país, para ser transferida su tecnología a la industria nacional

Objetivos Específicos:

\*Aerobomba de bajo costo, alta eficiencia y confiabilidad, para uso doméstico y de abrevaderos de ganado

\*Sistemas aerogenerador-bomba eléctrica, en el rango de 10 a 50 kW, para riego y drenaje agrícola, así como para sistemas comunales de agua potable

\*Aerogenerador de 2 kW, de bajo costo y alta eficiencia y confiabilidad, para uso doméstico rural o de señalización y telecomunicaciones

\*Aerogenerador de mediana capacidad (50 a 100 kW) a utilizarse en conjuntos integrados a circuitos primarios de distribución eléctrica, o asistiendo plantas diesel en pequeños sistemas aislados híbridos

### **2.1.2 Resultados y logros por línea**

#### **Meteorología Eólica**

\* Atlas Eólico Preliminar de los Estados Unidos Mexicanos

Se inició desde 1977 la actividad de compilar, evaluar y normalizar la información sobre el viento en México, proveniente de los observatorios meteorológicos y Estaciones Climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional, cuyo primer resultado se publicó en el Boletín IIE, Vol. 4, No. 8/9 de Agosto/Septiembre de 1980.

Esta información sirvió también como base de datos para la elaboración del Volumen I, México, del Atlas Eólico Preliminar de América Latina y el Caribe, de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE).



Al inicio de la década de los años 80, el SMN inició la creación de un banco de datos computarizado de los parámetros climatológicos en base diaria de su red de observatorios. En el IIE se desarrolló el "software" para el proceso de una cinta magnética con la información de 1971 a 1979, lo que fue objeto de una tesis de licenciatura en 1986. Dicha información se compiló durante un periodo de tres años, que fue interrumpido temporalmente por el sismo del 85 al destruir el centro de cómputo de la Secretaria de Agricultura y tener que utilizarse el centro del SMN que no había sufrido daños.

Dicho software fue modificado posteriormente para incluir un algoritmo de corrección de los datos de viento, considerando la forma del histograma de velocidades diarias, lo que permitía detectar situaciones de subestimación de velocidades por error instrumental o de exposición al viento del sensor anemométrico.

Durante 1994 se procesaron los datos de velocidad media del viento, velocidad y rumbo dominante y velocidad máxima y su rumbo, para los observatorios del SMN correspondientes a la década de los 80, con un software más sencillo. Aun cuando se procesaron veinte años de la información eólica nacional, proveniente del SMN, la base de datos resultante es, para fines de caracterización energética eólica nacional, muy pobre. Esto se debe a dos razones, la primera es que la red nacional de observatorios meteorológicos es muy exigua para el territorio nacional, ya que se contaba con dos y fracción observatorios por Estado. La segunda razón es que en 1996 y hasta la fecha, el Estado mexicano no ha mostrado voluntad política para la evaluación del recurso energético eólico en particular, ni de otras fuentes renovables en general.

Esta base de datos tiene un valor cualitativo al indicarnos la estacionalidad del viento, y sus rumbos dominantes, lo que correlacionado con el geomorfismo nos delimita las regiones de representatividad. Esta información permite extrapolar al ciclo anual las mediciones del viento que por varios meses se realizan con fines de evaluación energética en los sitios de interés para una posible explotación.

Aunado a la información eólica del SMN, el IIE realizó mediciones del viento en: El Tecamate, Municipio de San Marcos, Gro.; El Gavillero, Huichapan, Hgo.; San Rafael, Cd. del Maíz, SLP; Krutzio, Ensenada, Baja California; Guerrero Negro, Baja California Sur; tres

localidades en el extremo sur de la península de Baja California, Xcalak, Quintana Roo; Irapuato, Gto.; Atlahuacan, Mor.; el Valle de México, y en el propio Observatorio de Tacubaya, cuando se operó en él, un anemocinemógrafo electrónico, diseñado y construido en el IIE. Asimismo, se instalaron redes anemométricas en el sur del Istmo de Tehuantepec, la costa de Quintana Roo y Cozumel, los alrededores de Pachuca, Hgo., en el cerro de La Virgen, en Zacatecas, donde se hizo el primer estudio topográfico-eólico para la localización y distribución de aerogeneradores para integrar una Central Eoloeléctrica, y en el sur del estado de Coahuila.

Los esfuerzos del IIE por la evaluación y caracterización eólica del país, de las nueve áreas estudiadas, con 52 estaciones instaladas y 17 257 días de información, con datos de velocidades medias y rumbo prevaleciente de cada 15 minutos, permiten complementar la información recabada por el SMN durante dos décadas, los años 70 y 80, para inferir que el país cuenta con un potencial eólico explotable y significativo de reservas probables de oferta eléctrica al Sistema Eléctrico Nacional.

A partir de la década de los noventa y el desarrollo de las computadoras personales, y el advenimiento popularizado del CD-ROM, se ha hecho posible los estudios de prospección y evaluación preliminar del recurso energético eólico por medio de topografía digitalizada y programas de modelación computacional de dinámica de fluidos, junto a la información sinóptica de los vientos y estaciones anemométricas de referencia. De esta forma se ubican los posibles sitios de explotación en gran escala, y dada su extensión el intervalo de la capacidad instalable. El volumen de información utilizada y generada requiere de un sistema de administración de las bases de datos asociados a un sistema de información geográfica. Esto será posible en México cuando el Estado finalmente reconozca que la energía eólica es un recurso energético importante que requiere ser caracterizado y evaluado con la formalidad requerida.

Para la realización de los estudios anemométricos mencionados se desarrollaron metodologías de proceso y análisis de datos, así como las relativas a la prospección, localización y evaluación de sitios, lo que se documentó en el Manual de Meteorología Eólica, y la Guía de Diseño, Habilitación y Operación de Laboratorios Móviles de Climatología Eólica, ambos editados por la OLADE en 1984.

## **Instrumentación Electrónica**

Desde que se adquirieron e instalaron los primeros anemómetros comerciales, fue evidente que no se podía depender de equipamiento de importación, dado los costos y la dependencia que ello implicaba. A partir de 1981 se iniciaron informalmente los trabajos para el desarrollo de equipo anemométrico. Cuando en 1983 el CONACyT aprueba financiar la primera red anemométrica en el sur del Istmo de Tehuantepec, lo condiciona a utilizar equipo desarrollado por el IIE. Los primeros anemocinemógrafos electrónicos, el APTI-1-IIE utilizaba una calculadora electrónica con impresora, como dispositivo de salida, que imprimía las velocidades medias de cada 15 minutos, lo que facilitaba su captura para el proceso estadístico por la computadora, lo que en total tomaba 7 horas-hombre por periodo mensual de medición. Antes de ese equipo propio, la lectura de los registros gráficos de los anemógrafos y su procesamiento requería de 40 horas-hombre por cada mes de información. Después se realizó el APTI-2-IIE que registraba velocidad y dirección del viento.

Con la aparición comercial de las memorias de estado sólido no volátiles del tipo EPROM de 2K de capacidad, se desarrolló el *Anemodata*, cuya tablilla de memorias contenía tres "chips" donde se almacenaban los datos de un mes, y cuya transferencia a la computadora y su proceso ocupaba del orden de media hora. El desarrollo de nuevos dispositivos de memorias en tarjetas, de 8, 32 y 64 K de capacidad, así como de circuitos integrados CMOS de muy bajo consumo eléctrico, permitió el desarrollo del *SCAAUT* (Sistema Compacto de Anemometría Automatizada) que incluye un reloj electrónico donde registra automáticamente la fecha y hora del inicio y término del periodo de medición, simplificando las actividades de campo en la instalación y operación de anemómetros, ya que también realiza un autodiagnóstico de sus condiciones operativas y del estado de la memoria. Paralelamente al desarrollo de equipo anemométrico propio, se desarrolló la capacidad de integración de sistemas programables de adquisición de datos, constituyendo estaciones climatológicas a ser interrogadas vía telefónica, con enlace celular o por radio.

El IIE empezó a utilizar anemocinemógrafos electrónicos aún antes de que los hubiera comercialmente disponibles y su *software* de proceso de datos fue mejor que el suministrado por los fabricantes. La carencia de un plan nacional de caracterización y evaluación del recurso energético eólico no ha creado las condiciones para la reproducción de estos

equipos, más allá del orden de los 50 anemómetros, que en sus diferentes versiones se construyeron desde 1983 hasta 1993.

Paralelamente al desarrollo de equipo anemométrico, se desarrollaron e integraron sistemas de adquisición de datos y control para pruebas y operación de SCEE, para bombeo de agua y generación eléctrica.

### **Análisis de Aplicaciones y Sistemas**

La investigación estratégica respecto de aplicaciones, mercados y tecnologías relativos al aprovechamiento energético del viento, se tradujeron en diversos informes, de los cuales destacan los siguientes:

“Bombeo de Agua con Energía Eólica”, preparado para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicas, 1980.

Capítulo 7 de: Molinos de Viento, "Análisis Económico de sistemas de Bombeo Eólico", editado por OLADE en *La Revista Energética* Nos. 26, 27, 28 y 1/83. (1982,1983).

El “Manual de Integración de Aerogeneradores de Mediana Capacidad a Circuitos Primarios de Distribución Eléctrica”, editado por OLADE, 1985.

“Propuesta de Normas para Interconexión de Aerogeneradores a Circuitos Primarios de Distribución”. 1er. Borrador a consideración de CFE. 1985.

“Estimación Preliminar del Mercado de Aerogeneradores Integrados al Sistema Eléctrico Nacional”. 1987.

“Geografía de la Energía en México”. 1987

“Antecedentes, Situación Actual y Perspectivas de las Fuentes no Convencionales de Energía en México”. 1988.

“Enfoque Sistémico para el Uso Racional de Energía. Caso de la Energía Eólica”. 1988

“La Identificación del Perfil de Asimilación de FNCE en la Oferta Energética de un País”. 1989.

“El papel de las Fuentes No Convencionales de Energía en la Reestructuración de la Industria Eléctrica”. 1989.

“Desarrollo y Aplicaciones Potenciales de la Energía Eólica en México”. 1990.

“La Generación Eléctrica en México en el Siglo XXI”. 1990.

“Propuesta de Términos de Referencia para Convenios de Intercambio de Energía Eléctrica, entre la Empresa Suministradora y Municipalidades con Auto Abastecimiento Parcial, a base de Energía Eólica”. 1994.

“La Generación de Electricidad con Energía Eólica en México”. 1994.

“Generación Eoloeléctrica Integrada al Sistema Nacional Interconectado”. 1994.

“La Pequeña Producción Independiente de Energía Eléctrica”. 1995.

### **Desarrollo de Sistemas Conversores de Energía Eólica**

La infraestructura lograda para el desarrollo y pruebas de SCEE, consistió de la Estación Experimental de El Gavillero, Hgo., donde se instaló posteriormente el banco de pruebas de aerobombas y se ampliaron instalaciones. El Taller Móvil, que permitió los trabajos de campo, como las instalaciones en San Rafael, SLP y en Krutsio, Baja California, y el Túnel de Viento en Palmira, que se calibró en 1984. Los prototipos desarrollados y probados fueron los siguientes:

### **Aerobombas:**

- \* Aerobomba Savonius, de tres niveles con bidones de 200 litros. Instalada en San Rafael, SLP, en 1978. Altura máxima de bombeo de 10 m.
- \* Aeromotor de Velas de 8 m de diámetro, instalado como aerobomba en San Rafael, SLP, en 1978, que operó hasta 1983 por desecación del pozo.
- \* Aerobomba ITIA, metálica de 5 aspas y 2.5 m de diámetro. Patentada en 1986 y licenciada a una empresa para su manufactura.
- \* Aeromotor de Aspavela de 11 m de diámetro y 8 kW de potencia nominal, acoplable con un mecanismo de carrera variable a una bomba de pozo de desplazamiento positivo. La construcción del prototipo mostró los problemas para su posible reproducción industrial y operación, dada la baja calidad de los materiales nacionales. 1983.

### **Aerogeneradores:**

- \* Aerogenerador Savonius de 200 W. Probado en San Rafael, SLP, en 1978.
- \* Aerogenerador de 1,5 kW, con tres alternadores automotrices y aspas de duraluminio con ángulo de ataque variable. Probado en El Gavillero en 1978. Operó correctamente pero se consideró no reproducible económica y confiablemente, dada la complejidad de la transmisión mecánica.
- \* Aerogenerador de 2kW, "Fénix", con generador de imanes permanentes y aspas metálicas de lámina de hierro, formando el "esqueleto" de un perfil aerodinámico, probado en El Gavillero desde 1984.
- \* Aerogenerador "Albatros" de 10 kW, de aspavela y 11 m de diámetro, concebida para bombeo de agua con acoplamiento directo en frecuencia variable a una moto bomba vertical de tazonas de 7,5 HP, instalada en diciembre de 1983 en El Gavillero. Sufrió un rediseño completo y dos rotores diferentes adicionales, buscando la reproducibilidad industrial y la confiabilidad requerida.
- \* Aerogenerador "Mosquito" de 50 W de 0,9 m de diámetro, concebido originalmente como fuente de energía de recarga de baterías para las estaciones anemométricas remotas, en sustitución de paneles fotovoltaicos. Probado en el túnel de viento en 1990.
- \* Aerogenerador "Avispa" de 300 W, con base en un alternador automotriz, desarrollado originalmente como Tesis Profesional en 1990, ganando el Concurso Nacional de Tesis de Licenciatura para el Sector Eléctrico 1990. Su rediseño se orientó a su reproducibilidad industrial, a bajo costo y alta confiabilidad. Se inició trámite de patente en 1995.

\*En 1995 se rediseñaron y construyeron aspas de fibra de vidrio para el FÉNIX y se inició el rediseño del bastidor principal para su reproducción industrial.

Durante 1985 se propuso a CFE apoyar el desarrollo de un aerogenerador de 50 kW, y durante 1986 se realizó el diseño conceptual de un aerogenerador de 100 kW, con estimaciones de costos en lotes de 100 unidades y procesos de ensamblado. Se diseñó una central eoloeléctrica de 30 MW para la región de La Ventosa, Oax., y se estimaron los costos de inversión y de la energía producida, pronosticándose para el sitio de La Venta, Oaxaca, un factor de planta anualizado de 0,5 para aerogeneradores de 100 kW. La primera central eoloeléctrica en México entró en operación en ese lugar en julio de 1994, y sus primeros 12 meses de operación reportaron un factor de planta de 0,64 con máquinas de 220 kW, dos generaciones más modernas, el más alto logrado en central alguna en el mundo.

Cabe destacar, que los esfuerzos en el desarrollo de SCEE en el IIE, contaron principalmente con apoyos externos, de la Fundación General Electric a través de VITA (*Volunteers in Technical Assistance*), Organismo No Gubernamental de apoyo al desarrollo tecnológico en países del tercer mundo, y de la Organización de Estados Americanos, la que suspendió el apoyo por considerar que era la industria nacional la que debería continuar ese esfuerzo.

El sector energético nacional nunca ha considerado, hasta la fecha, que la energía eólica en particular y las renovables en general, pudieran tener una participación significativa en la oferta nacional de energía, por tanto carece de la voluntad política para su aprovechamiento.

### **2.1.3 Estudios y proyectos para generación eoloeléctrica integrada al SEN**

La generación eoloeléctrica integrada al Sistema Eléctrico Nacional, tanto como generación distribuida o centrales eoloeléctricas, fue uno de los aspectos medulares de los trabajos que sobre energía eólica se realizaron en el IIE. Este recurso energético, dada su relativa baja densidad y dispersión geográfica, se adapta más a una explotación vía productores independientes que suministren la energía eléctrica generada a la CFE, para su distribución final. Una central eoloeléctrica de 100 MW se considera grande, en tanto que comparada con

las centrales convencionales tal capacidad es pequeña. La experiencia mundial muestra que la participación de las fuentes renovables de energía en la generación eléctrica se da fundamentalmente a partir de autoabastecimiento y producción independiente, y en la medida de su masividad su penetración será mayor. Pero esto significa jugar otro juego cuyas reglas aún no están escritas, razón por la cual el trabajo en este rubro, ya señalado en las secciones anteriores, tuvo poco eco por parte de CFE.

En 1986, por iniciativa de la División Baja California de CFE, se realizaron estudios de prefactibilidad de una pequeña central eoloeléctrica de 1 MW en Guerrero Negro, BCS. Se realizó la propuesta y el proyecto se canceló en diciembre de 1987 por dificultades financieras. En 1991 el Área de Fuentes Nuevas y Renovables de Energía, dependiente de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de CFE, promovió dos proyectos demostrativos de 1 MW, en La Virgen, Zacatecas, y La Venta, Oaxaca. El IIE realizó los estudios y promovió el proyecto de La Virgen, como central de autoabastecimiento municipal para Zacatecas. El proyecto fue aprobado y financiado por BANOBRAS, y quedó en situación suspensiva, cuando ya se iban a iniciar obras civiles, al cambio de Gobernador y Presidente Municipal en septiembre de 1992.

Basados en los estudios del IIE realizados diez años antes, se licitó para la Venta, Oax., una central del orden de 1,5 MW, constituida por aerogeneradores en el intervalo de 200 a 300 kW, la que se construyó con 7 aerogeneradores daneses marca *Vestas* de 220 kW, totalizando 1540 kW, que entró en operación en julio de 1994.

## **2.2 Recurso energético eólico en México**

La determinación de la magnitud del recurso energético eólico de un país, en términos de reservas probadas y probables, como capacidad instalable en MW y generación posible en GWh, se realiza siguiendo una metodología semejante a la evaluación del potencial hidroeléctrico de un país. Se requiere de elaborar el inventario de cuencas eólicas y su caracterización, precisando los sitios, su extensión superficial en hectáreas, sus características topográfico-eólicas, la rosa de los vientos, vientos energéticos, rumbos dominantes, etcétera, lo que permitiría configurar la distribución topográfica de los



aerogeneradores y determinar un índice de capacidad instalable por hectárea, que multiplicado por la superficie total, indicaría la capacidad total instalable en el sitio. La velocidad media del viento en el mismo sería indicativa del factor de planta posible, y por tanto, de la generación bruta esperada en GWh/año. Este procedimiento cuantificaría reservas probables, la caracterización detallada, y a nivel de estudio de factibilidad, demostraría una reserva probada.

La información de las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional, de los aeropuertos y otras estaciones de medición anemométrica, actuando como datos de entrada, permiten identificar los lugares donde el viento se acelera, por encajonamiento o por el perfil topográfico, originando sitios con alto potencial energético eólico. La cuantificación del recurso corresponde por tanto a identificar e inventariar los sitios de posible aprovechamiento.

El Instituto de Investigaciones Eléctricas inició en 1977 el análisis de la información meteorológica de México para determinar el potencial eólico nacional. Procesar los datos de la década de los 70 de la información de los 67 observatorios con que contaba el SMN, fue un trabajo conjunto que ocupó varios años y sufrió un importante retraso por el terremoto del 85 que destruyó las computadoras de la Secretaría de Agricultura y las del SMN tuvieron que entrar en su apoyo.

Para el SMN digitalizar los registros diarios de las observaciones meteorológicas de la década de los setenta, le llevó casi tres años de trabajo a mediados de los años 80, y al IIE otros tantos el depurar y procesar la información meteorológica del SMN, la que es importante para caracterizar cualitativamente el viento, su estacionalidad, rumbos dominantes, porcentaje de calmas, vientos dominantes y energéticos, pero no así para determinar el potencial energético eólico de un país. Esta determinación corresponde a la elaboración de un inventario de "cuencas eólicas", la localización de sitios con potencial eoloenergético, su caracterización y evaluación preliminar para integrar las reservas probables. Identificar los sitios de posibles emplazamientos de centrales eoloeléctricas tiene un proceso semejante a localizar centrales hidroeléctricas.

El IIE propuso a CFE desde 1981 iniciar los estudios anemométricos en el sur del Istmo de Tehuantepec, en la región de La Ventosa, Oaxaca, donde en la carretera uno puede encontrar letreros de "cuidado con el viento", lugar donde viejos ingenieros de la CFE siempre ubicaron la localización de una gran central eoloeléctrica cuando esa tecnología estuviese disponible. Sin embargo, en 1981, cuando apenas despegaba la instalación de pequeños conjuntos de aerogeneradores en California, con grandes incentivos y facilidades, CFE veía a las centrales eoloeléctricas como algo aún muy lejano.

Aunque el IIE desarrolló anemómetros electrónicos con registro de datos en memorias de estado sólido desde mediados de los años 80, e inició los estudios del potencial eólico en el sur del Istmo de Tehuantepec, financiado por el CONACyT, la evaluación del recurso, en términos del inventario de reservas, no se ha iniciado en México. En términos relativos, nuestro SMN tenía una cobertura muy pobre; dos y fracción observatorios por Estado en promedio nacional. Costa Rica contaba con treinta observatorios hace 30 años. En México ha faltado la voluntad política para darle al SMN la importancia debida. Por otro lado, también ha faltado voluntad política para reconocer la importancia estratégica nacional de sus recursos energéticos renovables.

Por los trabajos del IIE en la identificación, caracterización y evaluación de sitios con potencial energético eólico, se ubicó en 1985 a La Venta, Oaxaca, como el sitio con mayores velocidades de viento en el sur del Istmo de Tehuantepec, donde en julio de 1994 inició pruebas operacionales la Central Eoloeléctrica de 1,54 MW de La Venta, construida por CFE a través de una licitación pública. En 1986 se realizaron estudios anemométricos en Guerrero Negro, BCS, y se elaboró el proyecto para asistir con 1 MW eólico, a la central térmica de Guerrero Negro, que opera con motogeneradores diesel de combustión interna y alimenta el sistema aislado de la población del mismo nombre. En 1987, con la firma del primer "Pacto para la estabilidad económica", se suspende la realización del proyecto por recortes presupuestales.

Por iniciativa de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de CFE, que tiene a su cargo el Departamento de Nuevas Fuentes de Energía, el IIE inicia en julio de 1991 el estudio del Cerro de la Virgen, junto a la ciudad de Zacatecas, para instalar una central demostrativa de 1 MW. Esa región: el oriente de Durango, Aguascalientes, Zacatecas y sur de Coahuila, es

donde el Sistema Nacional Interconectado tiene el mayor potencial de asimilación de generación eoloeléctrica en la actualidad, considerando su recurso eólico y las cargas del sistema eléctrico, el que por ahora aceptaría de 700 a 1000 MW eólicos.

Cuando a mediados de 1991 se modifica la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, permitiendo la figura de “Autoabastecimiento Eléctrico”, se establecen las bases jurídicas para que una municipalidad pueda ser autoabastecedor. En octubre de ese año, el IIE le propone al Municipio de Zacatecas y al Gobierno del Estado realizar el proyecto como central para el autoabastecimiento eléctrico del servicio de alumbrado público. El 12 de enero de 1992 el Cabildo Municipal aprueba la realización del proyecto con el financiamiento de BANOBRAS, iniciando los estudios topográfico-eólicos en el Cerro de La Virgen, para localizar una central de 2 MW, cuya estimación preliminar de generación eléctrica apuntaba a cubrir del orden del 80% del consumo de alumbrado público.

Los cambios de gobierno a nivel estatal y municipal, en septiembre de dicho año, dejaron suspendido definitivamente el proyecto, aun cuando ya se habían pagado anticipos del orden de 5 mil millones de viejos pesos, y estaban por iniciarse las obras civiles y eléctricas para recibir los aerogeneradores de la que fue la firma más importante de aerogeneradores en los Estados Unidos, *Zond Systems*, después subsidiaria de la compañía *Enron*, la mayor desarrolladora de gas natural y dueña también de *Solarex*, fabricante de celdas fotovoltaicas, la que después de su fracaso y escándalo financiero, vendió la división *Enron Wind Energy* a *la General Electric*. A Banobras le implicó un adeudo de 27 mil millones de viejos pesos y el Gobierno de Zacatecas pagó finalmente 14 mil millones, mil más de lo que costaba el proyecto, sin haber físicamente construido nada, perdiendo además el primer lote de aerogeneradores que en California estaban listos para embarcarse a Zacatecas.

El IIE realizó estudios en la costa de Quintana Roo, contratado por FIDECARIBE, en los alrededores de Pachuca, Hgo., en un estudio para la compañía Real del Monte y Pachuca, para evaluar autoabastecimiento eléctrico. En ese mismo estado, en el municipio de Huichapan, operó por veinte años la Estación Experimental Eoloeléctrica de El Gavillero. Estación construida por CFE, por el antiguo Instituto de Investigaciones de la Industria Eléctrica (IIIE), antecesor del actual IIE, el que desde 1967 realizó prospección de sitios

ventosos e instaló pequeños aerogeneradores en diversos lugares del país, en Baja California Norte, Sonora, Veracruz, Puebla y Oaxaca.

El IIE también realizó mediciones en Guerrero, en Chilpancingo y en la costa, en el municipio de San Marcos, por encargo de la Impulsora Guerrerense del Cocotero, en 1978. En Baja California Sur en colaboración con el Centro de Investigaciones Biológicas, en Irapuato con la Universidad de Guanajuato, en el sur de Coahuila por un contrato con una asociación civil, inclusive en el propio Observatorio de Tacubaya donde se compararon las mediciones del equipo del IIE con las del propio observatorio. Todos estos trabajos de prospección y mediciones anemométricas, realizadas tanto por CFE, como por el IIE y otras instituciones a lo largo de los últimos treinta años, constituyen un acervo que complementa la caracterización nacional con los datos del SMN, dando los elementos suficientes para considerar que existen en el país los sitios ventosos necesarios para la instalación de la capacidad eoloeléctrica necesaria.

Como muestra de esta capacidad señalaremos que en la región sur del Istmo de Tehuantepec existen del orden de 1000 kilómetros cuadrados con excelentes vientos, que generalmente soplan de norte a sur, o de sur a norte. Esta característica permite colocar filas cerradas de grandes aerogeneradores en ejes este-oeste con una densidad energética de 200 kW/hectárea. Si esta región del país no tuviese otro uso del suelo que instalar aerogeneradores, podría contener 20 mil MW eoloeléctricos; aún así quedaría libre para actividades agrícolas el 90% del suelo. El aprovechamiento en gran escala de la energía eólica requiere de regulaciones para la explotación de los sitios ventosos, declararlos reservas nacionales y concesionar el Estado su explotación comercial.

La indefinición jurídica de este recurso energético nacional renovable puede constituir un obstáculo al desarrollo de estos proyectos en México. Ya se dio el caso de un litigio en las cortes del estado de California en los Estados Unidos, por terrenos ejidales en Baja California Norte, para un proyecto mexicano, cercano a donde se pretendía construir una central eoloeléctrica para exportar energía eléctrica a Estados Unidos por parte de empresas estadounidenses. Por otro lado, en Oaxaca, por falta de una legislación adecuada, los proyectos de centrales eoloeléctricas en la región de La Ventosa, han derivado en problemas con las comunidades.

Actualmente existen varios proyectos para construir centrales eoloeléctricas en México; CFE planea ampliar la instalación de La Venta Oaxaca a 80 MW, los ocho municipios de Quintana Roo, en sociedad con una empresa privada, habían solicitado y obtenido permiso de la Comisión Reguladora de Energía para una central de 30 MW en Cozumel, cuya generación se acreditaría a los consumos por servicios municipales. En Baja California tres municipios, Tijuana, Tecate y Ensenada, estaban asociados con la misma empresa privada para instalar una central de 30 MW en su primera etapa para sus servicios municipales, cumplido el trámite de permiso en la CRE. Lo mismo dos centrales en la región sur del Istmo de Tehuantepec, una para servicios municipales en el estado de Oaxaca y otra para una empresa cementera en la región, a los que se han sumado varios proyectos nuevos impulsados por empresas transnacionales.

Estos proyectos tienen aún incertidumbres por cuanto a los términos a detalle de los convenios con CFE para el porteo y acreditación de la energía generada a los servicios públicos municipales o a los “socios para autoabastecimiento”. El Reglamento de la Ley tiene aún muchas lagunas, como la Ley misma, respecto de energías renovables y pequeña producción para autoabastecimiento municipal, que es el mercado natural para centrales eoloeléctricas e hidroeléctricas en el orden de varios MW.

## **2.3 Análisis preliminar del viento en la Republica Mexicana**

### **2.3.1 Antecedentes**

A principios de 1977 se inició en el Departamento de Fuentes No Convencionales de Energía del Instituto de Investigaciones Eléctricas, el proyecto de infraestructura "Aprovechamiento de la Energía Eólica", se habían estudiado diversos sitios con potencial eólico y llevado a la par el desarrollo de prototipos tanto para la generación eléctrica, como para el bombeo de agua.

En 1983, dentro del plan de evaluación del recurso eólico a nivel nacional, se tuvo un acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional a fin de que toda la información consignada

en la red nacional de observatorios fuera proporcionada al IIE para llevar a cabo el procesamiento preliminar de los datos de viento y otros parámetros meteorológicos, correspondientes al período de 1971 a 1979.

Los primeros resultados mostraron una serie de problemas con la información, por lo que se decidió llevar a cabo un reprocesamiento, considerando métodos que se apegarán mejor a las características de los datos fuente. A principios de 1986 se llevó a cabo dicho reprocesamiento con el objeto de crear bases de datos con los resultados mensuales, estacionales y anuales de viento, temperatura, humedad, presión, insolación y precipitación. Estas bases de datos fueron depuradas y se eliminó aquella información que presentaba períodos menores al 50% de tiempo.

Durante 1988 se calcularon finalmente los valores promedio de viento y otros parámetros climatológicos para el período total, mediante los cuales se analizó cualitativamente el comportamiento del viento constituyendo así la primera etapa de evaluación del potencial eólico en la República Mexicana.

### **2.3.2 Procesamiento de la información meteorológica**

La información meteorológica consignada por la Red de Observatorios del Servicio Meteorológico Nacional, proporcionada al Instituto de Investigaciones Eléctricas, contenía los registros diarios de:

- Temperatura máxima
- Temperatura mínima
- Temperatura de bulbo seco
- Temperatura mínima en intemperie
- Humedad bulbo húmedo
- Humedad punto de rocío
- Humedad relativa máxima
- Humedad relativa mínima
- Precipitación

- Precipitación máxima de una hora
- Tipo de precipitación
- Evaporación
- Tensión de vapor
- Horas de sol
- Presión reducida a nivel del mar
- Dirección del viento dominante
- Velocidad del viento dominante
- Velocidad del viento máximo
- Velocidad máxima
- Velocidad media
- Nubosidad
- Tipo de visibilidad
- Escarcha
- Granizo
- Heladas
- Tormentas eléctricas
- Truenos
- Niebla
- Nevadas
- Humo
- Polvo

A partir de esta información se obtuvieron los valores medios en forma mensual, estacional y anual de:

- Velocidad media
- Velocidad media corregida (calculada a partir de los conceptos de varianza y los valores del factor K de la función de distribución de probabilidad de Weibull)
- Velocidad y rumbo del viento máximo
- Factores K de la f.d.p. de Weibull por el método del kilómetro más rápido
- Rumbo del viento dominante
- Tipo de varianza

- Temperatura media
- Temperatura mínima
- Temperatura máxima
- Humedad relativa promedio
- Número de horas con sol
- Precipitación

Los resultados eran agregados estadísticos para cada observatorio que mostraban características generales, aún cuando en dichos resultados existen lagunas considerables, en conjunto son de suma utilidad para tener una concepción cualitativa del comportamiento del viento, así se pueden delimitar áreas de interés donde se lleven a cabo estudios anemométricos detallados.

## **2.4. Climatología eólica de la República Mexicana**

### **2.4.1 Regiones eólicas**

El estudio del viento en la República Mexicana requiere como primer paso el delimitar zonas homogéneas en cuanto al comportamiento del viento. Debido al vigoroso relieve de nuestro territorio, es necesario considerar las principales regiones geomórficas formadas en torno o en medio de unidades orogénicas, ya que bajo ciertas condiciones del viento es posible describir su comportamiento en la región contando con información recabada en algún punto.

Las principales unidades orogénicas con que cuenta el país son:

- Sierra Madre Occidental
- Sierra Madre Oriental
- Cordillera Neovolcánica
- Sierra Madre del Sur
- Sierra Madre de Oaxaca
- Portillo Ístmico
- Sierra Madre de Chiapas



- Plataforma Yucateca
- Sistema Californiano

En torno a éstas se presentan las siguientes regiones geomórficas:

- I. Planicie costera nororiental
- II. Planicie costera central del Golfo de México
- III. Planicie costera del sureste
- IV. Altiplanicie septentrional
- V. Altiplanicie meridional
- VI. Depresión del Balsas o austral
- VII. Valle central de Chiapas
- VIII. Planicie costera noroccidental
- IX. Planicie costera sudoccidental
- X. Planicie costera ístmica chiapaneca
- XI. Vertiente oriental californiano
- XII. Vertiente occidental californiana
- XIII. Plataforma yucateca

Por la situación geográfica del territorio nacional se tiene la acción de dos grandes sistemas: el correspondiente al sistema tropical y el característico de las zonas templadas.

Entre los meses de mayo a octubre casi la totalidad del territorio se encuentra bajo la influencia de los vientos alisios. En la península de Yucatán, por la concurrencia de las perturbaciones conocidas como ondas del este, se observa en los niveles bajos un aumento en la intensidad de estos vientos.

A continuación se describe por regiones geomórficas el comportamiento del viento, a partir de los vientos dominantes y máximos observados durante el período 1971 a 1979 en los observatorios de la Red Meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional.

### **Planicie costera nororiental**

En esta región comprendida por gran parte del estado de Tamaulipas se observa, durante los dos primeros meses del invierno, vientos dominantes del N y en el mes de marzo se presenta un cambio de vientos con rumbo E-SE. Este último mes es de transición, ya que durante toda la primavera la región se ve afectada por vientos del E. En el verano hay gran influencia de vientos con rumbo E en la zona sur y del E-SE en la parte norte. Durante el otoño se observa un período de transición y nuevamente comienza a darse una condición generalizada de vientos del N en toda la región.

### **Planicie costera central del Golfo de México**

Esta región la constituye la parte sureste del estado de San Luis Potosí y gran parte del estado de Veracruz, en ella se observa una marcada influencia de vientos intensos del N durante todo el invierno y existe además una corriente del SE de vientos tenues al occidente de Veracruz en las laderas de la Sierra Madre Oriental. En el mes de abril se observan vientos dominantes del E en toda la región y en mayo se tiene la influencia de vientos que provienen del N. Al finalizar la estación los vientos son del NE, con un flujo del SE cercano a la sierra frente a Veracruz.

En el verano se observa en un principio influencia de vientos del E excepto en Veracruz donde durante toda la estación la influencia de vientos son del N, en agosto la zona norte conserva el rumbo del E mientras que frente a Tuxpan los vientos son del N. En septiembre los vientos son del N excepto en Jalapa donde al parecer domina el fenómeno de brisa. En el otoño toda la región se ve influenciada por vientos del N intensos y al igual que el resto del año sigue existiendo el flujo del SE frente a Veracruz en la laderas de la Sierra Madre.

### **Planicie costera del sureste**

Esta planicie está formada por el extremo sureste del estado de Veracruz y el estado de Tabasco, en esta región se observa que durante toda la estación hay influencia de la onda

del este y se manifiestan vientos del mismo rumbo que barren la parte central y oriental del estado de Tabasco. Durante el invierno toda la región está influenciada por vientos del N y hay una ligera variación en diciembre en que los vientos en la parte central se manifiestan del NE.

### **Altiplanicie Septentrional**

Esta región geomórfica abarca la parte oriental del estado de Chihuahua, con vientos dominantes del SO contrarios al flujo general de la región, debido a esto la influencia de vientos tipo valle-montaña en ese lugar. En la primavera se observan nuevamente vientos marcados del NE a excepción de Chihuahua, en que los vientos contrarios denotan una fuerte componente local.

En el verano se tiene el mismo esquema general de vientos del NE y existen vientos locales en Chihuahua del SE. Al mes siguiente, el rumbo de este sitio cambia hacia el N, y en septiembre se tiene un comportamiento general de vientos del NE. Al comenzar el otoño se observan dos flujos en la región: uno del NE que sube por las laderas de las montañas con dirección SE; en noviembre hay un flujo general del N y una influencia local en Chihuahua. Por último en diciembre se observa que no existe una condición general clara, debido a la influencia local de vientos valle-montaña en la parte sur y parte occidental del altiplano, sin embargo aún persisten los vientos del NE a lo largo de las zonas noroeste, centro y suroeste.

### **Altiplanicie Meridional**

En esta región, constituida por gran parte del estado de Jalisco, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro, el sur de Zacatecas y San Luis Potosí, y el noroeste de Michoacán, el desarrollo del viento es complejo ya que en diversas zonas existen fenómenos locales interactuando sobre los esquemas generales de circulación. A continuación se hace una descripción de los flujos observados en las distintas zonas de la región:

## **Zona norte**

En esta zona, cuyos límites abarca del sur de Zacatecas y San Luis Potosí, existen durante el invierno vientos del SW en la parte central, mientras que en la parte oriental son del SE.

En la primavera el esquema de vientos se mantiene, excepto en la parte oriental donde se dan lugar vientos contrarios debido a la entrada de masas de aire provenientes de la región costera. Durante gran parte del verano y a principios de otoño se observan en la parte central vientos que provienen del octante N-NE mientras que en el oriente se presentan del SE.

Durante el otoño en la parte central se desarrollan vientos del SW en noviembre y del N en diciembre. Al oriente, durante estos dos meses, se conservan los vientos del SE en Río Verde, mientras que en Matlapa se presentan del N en noviembre y en diciembre cambian nuevamente a SE.

## **Zona Central**

En esta zona, comprendida por la parte central del estado de Jalisco, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro y la parte norte de Michoacán, se observa durante el invierno el predominio de vientos del N que se deflecan hacia el N, rumbo a vientos del W que se deflecan hacia el N, rumbo a Aguascalientes, debido a la presencia de sistemas montañosos. En la parte oriental de esta zona convergen vientos locales del N, y del S y SW que van de los límites de la Cordillera Neovolcánica.

En la primavera existen cambios radicales respecto al comportamiento del viento en la zona, debido a que se presentan temperaturas medias más altas. En Guadalajara los vientos del MNW son menos intensos, teniendo como consecuencia el desarrollo de vientos locales del N en Aguascalientes ya que el flujo que entraba por el S, ha perdido intensidad. En Lagos de Moreno se manifiestan vientos del N, en León del SE mientras que en Querétaro y Guanajuato el flujo del NE; en Morelia se presentan vientos del SW.

Durante el verano existe la tendencia de un flujo general de NE a SW, entrando hacia Guadalajara por el E y a Morelia por el N, excepto en septiembre, cuando en este lugar se presenta intenso el fenómeno local, existiendo vientos del S.

En noviembre y diciembre el esquema anterior del flujo se pierde observándose nuevamente un carácter local en cada zona.

### **Zona Sudoccidental**

En esta porción, constituida por la parte sureste de Jalisco, está influenciada la mayor parte del año por vientos provenientes del octante S-SE que pasan a través de un corredor orientando de norte a sur, debajo de la planicie que circunda la ciudad de Guadalajara. La conclusión que resalta a simple vista es la presencia de un fenómeno general en la altiplanicie meridional, con vientos una parte del año del SW y la otra del NE.

### **Depresión del Balsas**

En esta región, formada por parte del estado de Michoacán y el norte de Guerrero, no se cuenta con información de viento de observatorios meteorológicos, por lo que no es posible describir el comportamiento del viento.

### **Valle Central de Chiapas**

Esta región se localiza entre la meseta central y la Sierra Madre de Chiapas, extendiéndose de WNW a ESE, con altitudes entre los 600 y 900 metros. Durante todo el año el rumbo dominante en la parte norte de esta región es del NW ya que los vientos del N al encontrarse los obstáculos orográficos sufren una deflexión. En la zona sur, hacia el Golfo de Tehuantepec, existen pasos formados por sistemas montañosos aislados, de ahí que esta parte se ve influenciada por vientos del NE.

Por la cercanía con la costa existen vientos locales que se contraponen al flujo del NE y en ocasiones llegan a presentarse vientos del SE, esto es, que el fenómeno de brisa llega a ser mas intenso.

### **Planicie Costera Noroccidental**

Esta región, constituida por la porción costera de los estados de Sonora y Sinaloa, tiene durante el invierno la influencia de fenómenos de tipo brisa, a excepción del mes de enero en Guaymas en que los vientos dominantes vienen del NNW. En la primavera se observa este fenómeno más acentuado y existe en la región un aumento de la temperatura media. Durante el verano y el primer mes de otoño se presenta el mismo fenómeno, existe la influencia de

vientos provenientes del octante N-NW, manifestados en Guaymas y Ciudad Obregón, ambas en Sonora.

### **Planicie Costera Sudoccidental**

En esta región, formada por la porción costera de Jalisco, Colima y Michoacán, se tiene durante el invierno y la primavera flujo del mar hacia la tierra, en el verano y otoño este mismo fenómeno se observa en casi toda la región exceptuando la zona de Manzanillo en que se presentan terrales, manifestados como vientos del N.

### **Planicie Costera Ístmica Chiapaneca**

Esta región está constituida por la parte sur del Istmo de Tehuantepec y la costa del estado de Chiapas. Debido a las características orográficas que circundan esta región, la dividiremos en tres partes:

- La parte sur del Istmo de Tehuantepec, bajo el portillo ístmico
- La parte costera de Chiapas al suroeste del Valle Central
- La parte costera frente a la Sierra Madre de Chiapas

La zona costera del Istmo de Tehuantepec se encuentra influenciada por vientos intensos del N durante los dos primeros meses del invierno; a partir de marzo y durante los meses de abril y mayo, se desarrollan vientos del S, debido a que el fenómeno de brisa es más intenso que el sistema general de vientos del N, aún presente; este hecho se manifiesta en que las velocidades dominantes sean del mismo orden que las velocidades medias. La demás época del año se observan vientos intensos provenientes del N, debido a la influencia de un sistema general en la zona.

La zona costera de Chiapas al suroeste del Valle Central está influenciada por el régimen de vientos generales provenientes del NE y el fenómeno local de brisa. En el invierno se manifiestan los vientos del NE, en el mes de enero hay una mayor influenciada de la brisa y se observan vientos predominantes del SW. En la primavera, durante el mes de abril se presentan vientos del NE, mientras que en mayo se manifiestan temperatura media y extrema en la zona; en junio y durante todo el resto del año se observan vientos de la dirección N-NE, lo cual tiene consecuentemente una influencia mayor del régimen general.

La zona costera frente a la Sierra Madre de Chiapas se encuentra influenciada por vientos de origen local de tipo brisa, durante el invierno se observan vientos provenientes del octante N-SW, mientras que el resto del año se tienen vientos del N provenientes de la zona montañosa.

### **Vertiente Oriental Californiana**

En esta región no se cuenta con observatorios del Servicio Meteorológico Nacional, lo cual dificulta el conocimiento del comportamiento del viento, sin embargo es de esperarse el predominio de sistemas de tipo brisa, ya que existen vientos de magnitud apreciable con rumbos dentro del cuadrante del W-N resultado de la superposición del viento de altura que influye a toda la península y el flujo de tierra a mar o terral. En La Paz se observa durante el invierno, en los meses de enero y febrero, el viento dominante es del NE y en marzo el flujo es franco del N, perpendicular a la bahía. Durante toda la primavera y el verano los vientos dominantes provienen del S y en el otoño cambian, en los meses de noviembre y diciembre el rumbo nuevamente al NE.

### **Vertiente Occidental Californiana**

Esta región localizada al occidente de la península de Baja California está influenciada durante todo el año por vientos del NW, se observa una deflexión en la Bahía de Sebastián Vizcaíno, donde entran en superficie por el rumbo W. Los vientos más intensos se dan durante la primavera, diciembre y enero son los meses de menor intensidad promedio.

### **Plataforma Yucateca**

Otra gran porción de tierra la constituye la plataforma yucateca formada por los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo en donde se observa que durante los dos primeros meses del invierno predominan los vientos provenientes de los octantes NNE-ESE y ENE-ESE, en la última parte de la estación se tienen vientos dominantes del SE en toda la península. Durante la primavera se observa una mayor consistencia en cuanto a los rumbos, la mayor parte del tiempo existen vientos en el octante E-SE, sin alteraciones apreciables. En el verano convergen en la plataforma los flujos de NE-E en la parte norte del estado de Quintana Roo y todo el estado de Yucatán y de E-SE en el sur de Quintana Roo y la parte central y sur del estado de Campeche, pudiendo existir velocidades intensas en la parte central de la plataforma yucateca. Durante el otoño existe una marcada influencia de vientos

del N sobre todo en los meses de noviembre y diciembre, existiendo perturbaciones debido a fenómenos locales.

#### **2.4.2 Regiones eoloenergéticas**

Por lo expuesto hasta aquí, se describe el comportamiento del viento preliminarmente bajo la consideración de que falta aún mucho trabajo por realizar en la mayor parte del territorio, ya que no se cuenta con información adecuada para la determinación del potencial eólico. Sin embargo, de manera preliminar se pueden delimitar zonas donde, dadas las condiciones meteorológicas observadas, es posible encontrar áreas de interés para la explotación energética del viento. Entre dichas zonas podemos mencionar las siguientes.

- Planicies costeras oriental y occidental de la península de Baja California
- Planicie costera del Golfo de México
- Parte norte y noreste de la península de Yucatán
- Planicie costera de los estados de Oaxaca y Chiapas
- Parte norte del altiplano meridional

Obvio es que se requiere llevar cabo estudios de prospección en los que se analicen en detalle tanto zonas de aprovechamiento probable, como regiones donde no exista información, determinando a la par la factibilidad económica de la implantación de sistemas accionados por viento, bajo un esquema real de costos de producción energética por métodos convencionales.

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, la existencia de vientos técnicamente aprovechables y económicamente viables en las siguientes regiones:



### **Sur del Istmo de Tehuantepec**

Esta región contiene un área del orden de 1000 km cuadrados, 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, que origina un gradiente térmico y de presión que da lugar a un intenso viento del norte desde el otoño hasta la primavera. Esta región, considerando la infraestructura eléctrica existente y otros usos del suelo, podría asimilar una capacidad instalada del orden de los 2 mil a 3 mil 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. En las inmediaciones del poblado de La Venta, Oaxaca, se instaló en 1994 la primera mini central eoloeléctrica en México, con una capacidad de 1 575 kW, constituida por siete aerogeneradores de 225 kW.

### **Península de Baja California**

Esta península es interesante eoloenergéticamente, por varias razones: su extensión geográfica, su baja densidad poblacional y eléctricamente alimentada por sistemas aislados, cuando eólicamente es 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 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**

Desde la región central de Zacatecas a la frontera con los Estados Unidos, el norte del país 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, que en Pachuca, la bella airosa, son más conocidos. Estos vientos complementan estacionalmente, a los del altiplano norte y los del sur del Istmo de Tehuantepec. La complejidad orográfica de esta región debe dar 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 presentan por lo menos condiciones para generación eléctrica en pequeña escala y almacenamiento en baterías, sistemas híbridos diesel-eólicos y en otros generación interconectada. La generación eoloeléctrica en gran escala en las costas para la producción de hidrógeno, constituirá una de las principales aplicaciones a mediados del próximo siglo.

A mediados del siglo, cuando las termoeléctricas a combustóleo y carbón sean historia, y la población en México se estabilice alrededor de los 130 millones de mexicanos, nuestro sistema eléctrico deberá alcanzar del orden de los 125 mil MW instalados. En esas condiciones, la energía eólica podrá contribuir con la generación eléctrica de el orden de 50 mil MW instalados de aerogeneradores, un gran porcentaje de ellos produciendo hidrógeno para centrales turbogás.

### **Patrones de oferta energética estacional**

De la estacionalidad del viento observada en las diferentes regiones del país, derivada de la información del SMN, así como de mediciones con fines eoloenergéticas y de las simulaciones de generación eléctrica con aerogeneradores modernos, para estimar factores de planta mensuales, es posible determinar índices mensuales de proporcionalidad al valor

medio mensual de generación eoloeléctrica. El siguiente cuadro muestra los índices encontrados para las regiones:

**Centro Norte** (Aguascalientes, Zacatecas, Durango y sur de Chihuahua y Coahuila)

**Área Central** (Tlaxcala, Hidalgo, Querétaro, Guanajuato, Estado de México)

**Sur del Istmo de Tehuantepec** (Oaxaca)

**Costa del Caribe** (Quintana Roo)

**Norte** de la península de Baja California

De estas regiones se cuenta con información confiable, aún se requiere de trabajo exploratorio y mediciones en gran parte del territorio nacional.

### **Patrón Anual de Oferta Eoloeléctrica Regional**

(Factores de proporcionalidad sobre el promedio mensual)

| <b>REGIÓN</b>     | <b>Ene</b> | <b>Feb</b> | <b>Mar</b> | <b>Abr</b> | <b>May</b> | <b>Jun</b> | <b>Jul</b> | <b>Ago</b> | <b>Sep</b> | <b>Oct</b> | <b>Nov</b> | <b>Dic</b> |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Centro N</b>   | 1,13       | 1,2        | 1,2        | 1,16       | 1,03       | 0,9        | 0,8        | 0,8        | 0,8        | 0,86       | 0,96       | 1,06       |
| <b>Central</b>    | 0,96       | 1,03       | 1,14       | 1,07       | 1,07       | 1,10       | 1,10       | 1,03       | 0,93       | 0,83       | 0,8        | 0,9        |
| <b>Istmo</b>      | 1,42       | 1,33       | 1,11       | 1,11       | 0,46       | 0,44       | 0,71       | 0,8        | 0,84       | 1,13       | 1,22       | 1,22       |
| <b>Caribe</b>     | 1,07       | 1,2        | 1,24       | 1,24       | 1,14       | 1,03       | 0,9        | 0,8        | 0,8        | 0,8        | 0,86       | 0,96       |
| <b>Norte B.C.</b> | 1,22       | 1,32       | 1,35       | 1,45       | 1,26       | 1,16       | 0,87       | 0,48       | 0,39       | 0,8        | 0,9        | 0,74       |

\* Promedio mensual = Generación bruta anual dividida entre 12

Los índices mostrados indican la estacionalidad esperada en la generación eoloeléctrica, la que deberá ser comparada con la demanda eléctrica estacional, para efectuar los análisis de compatibilidad y determinar el nivel de penetración posible.

Por lo que respecta a los patrones horarios, se dispone también de esta información, la que deberá ser cotejada con los patrones horarios de demanda y establecer niveles de compatibilidad y de penetración de la generación eoloeléctrica. Las desviaciones horarias sobre el patrón horario típico de vientos tienen una componente de varias horas que afecta a una pequeña zona geográfica, y otra componente de varios días con una cobertura

geográfica mayor. Dado que estas desviaciones tienen un carácter aleatorio, varias centrales eoloeléctricas dentro de una misma región eólica tienden a tener una compensación natural a esas desviaciones, acercándose más la generación eoloeléctrica agregada total al patrón típico de vientos de esa región.

## Factores de planta

Los índices mostrados indican la estacionalidad esperada en la generación eoloeléctrica, la que deberá ser comparada con la demanda eléctrica estacional, para efectuar los análisis de compatibilidad y determinar el nivel de penetración posible; por lo que respecta a los patrones horarios, la información disponible es restringida y se muestra en la tabla siguiente:

**Regiones geográficas y patrón diario de generación eoloeléctrica**

| <b>PERIODO</b>   | <b>Patrón diario</b> | <b>Istmo de Tehuantepec</b> | <b>Costa de Quintana Roo</b> | <b>Norte de Baja California</b> |
|------------------|----------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| <b>Primavera</b> | <i>Pico</i>          | 12 - 15 hrs                 | 19 - 21 hrs                  | 17 - 18 hrs                     |
|                  | <i>Valle</i>         | 20 - 01 hrs                 | 03 - 04 hrs                  | 07 -08 hrs                      |
| <b>Verano</b>    | <i>Pico</i>          | 11 - 14 hrs                 | 13 - 16 hrs                  | 17 - 18 hrs                     |
|                  | <i>Valle</i>         | 23 - 01 hrs                 | 03 - 04 hrs                  | 08 -09 hrs                      |
| <b>Otoño</b>     | <i>Pico</i>          | 03 -22 hrs                  | 14 - 15 hrs                  | 13 - 14 hrs                     |
|                  | <i>Valle</i>         | 00 - 01 hrs                 | 01 - 03 hrs                  | 20 - 21 hrs                     |
| <b>Invierno</b>  | <i>Pico</i>          | 13 - 14 hrs                 | 11 - 12 hrs                  | 12 - 14 hrs                     |
|                  | <i>Valle</i>         | 19 - 21 hrs                 | 01 - 03 hrs                  | 19 - 20 hrs                     |

Se requiere un análisis más detallado de las velocidades medias horarias en los sitios de explotación posibles en las Regiones Norte y Central, donde la complejidad orográfica da lugar a componentes locales de viento con un efecto muy marcado en los patrones diarios. De la información disponible se infiere una tendencia general a tener el pico de generación vespertino, o en las primeras horas de la noche, en tanto la mínima se esperaría al amanecer.

### 3. Factores de Capacidad esperados

Una estimación preliminar de los factores de capacidad (factores de planta mensuales) al considerarse velocidades esperadas a 40 metros de altura en sitios con condiciones eólicas adecuadas a su explotación energética, homologando los sitios identificados, explorados y caracterizados en dichas regiones, y simulando generación con aerogeneradores de 500 kW, permite presumir que existen condiciones adecuadas para una explotación eoloenergética en gran escala en condiciones de viabilidad técnico económicas muy favorables.

#### **Escenarios estimados de factores de planta mensuales para centrales eoloeléctricas integradas al Sistema Nacional Interconectado**

| <b>REGIÓN</b>      | <b>Ene</b> | <b>Feb</b> | <b>Mar</b> | <b>Abr</b> | <b>May</b> | <b>Jun</b> | <b>Jul</b> | <b>Ago</b> | <b>Sep</b> | <b>Oct</b> | <b>Nov</b> | <b>Dic</b> |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Centro Nte.</b> | 0,34       | 0,36       | 0,36       | 0,35       | 0,31       | 0,27       | 0,24       | 0,24       | 0,24       | 0,26       | 0,29       | 0,32       |
| <b>Central</b>     | 0,28       | 0,30       | 0,33       | 0,31       | 0,31       | 0,32       | 0,32       | 0,30       | 0,27       | 0,24       | 0,23       | 0,26       |
| <b>Istmo</b>       | 0,64       | 0,60       | 0,50       | 0,50       | 0,21       | 0,20       | 0,32       | 0,36       | 0,38       | 0,51       | 0,55       | 0,55       |
| <b>Promedio</b>    | 0,385      | 0,39       | 0,38       | 0,367      | 0,285      | 0,277      | 0,30       | 0,30       | 0,29       | 0,312      | 0,325      | 0,347      |

Para la costa del Caribe en Quintana Roo, Cozumel e Isla Mujeres, y el norte de la península de Baja California, en la zona fronteriza con los EUA, así como para Guerrero Negro en Baja California Sur, los factores de planta esperados son:

#### **Factores de planta mensuales estimados**

| <b>Región</b>     | <b>Ene</b> | <b>Feb</b> | <b>Mar</b> | <b>Abr</b> | <b>May</b> | <b>Jun</b> | <b>Jul</b> | <b>Ago</b> | <b>Sep</b> | <b>Oct</b> | <b>Nov</b> | <b>Dic</b> |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Caribe</b>     | 0,31       | 0,35       | 0,36       | 0,36       | 0,33       | 0,30       | 0,26       | 0,23       | 0,23       | 0,23       | 0,25       | 0,28       |
| <b>Gerrero N.</b> | 0,20       | 0,25       | 0,27       | 0,30       | 0,37       | 0,37       | 0,34       | 0,33       | 0,34       | 0,31       | 0,26       | 0,23       |
| <b>N. B. C.</b>   | 0,38       | 0,41       | 0,42       | 0,45       | 0,39       | 0,36       | 0,27       | 0,15       | 0,12       | 0,25       | 0,28       | 0,23       |

De los factores mostrados en las tablas precedentes se derivan condiciones muy favorables de explotación eólica, ya que los promedios anuales de factor de planta son relativamente altos comparados con la media de Dinamarca o California (EUA) del orden de 0,25.

## Factores de Planta Anualizados

Aerogeneradores de 500 kW

| REGIÓN                   | Factor de Planta estimado |
|--------------------------|---------------------------|
| Centro Norte             | 0,30                      |
| Área Central             | 0,29                      |
| Istmo de Tehuantepec     | 0,45                      |
| Costa de Quintana Roo    | 0,29                      |
| Guerrero Negro, BCS*     | 0,29                      |
| Norte de Baja California | 0,31                      |

\* Aerogenerador de 750 kW @ 65 m el eje

*El potencial técnico de energía eólica en el territorio nacional, dada la conformación misma del terreno, el amplio litoral, y el altiplano semidesértico, constituye una reserva probable que se sitúa entre los 50 mil y 100 mil MW.*

# CAPÍTULO 3

## DESARROLLOS TECNOLÓGICOS EN MÉXICO

### PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA EÓLICA

#### 3.1 CFE y las primeras experiencias institucionales de generación eoloeléctrica en México

Como parte de su estructura organizacional, existió en CFE hasta 1976 el Instituto de Investigaciones de la Industria Eléctrica, el IIIE. Este Instituto inició hace 40 años experiencias de generación eléctrica aislada con pequeños aerogeneradores. La información rescatada nos permite reconstruir la siguiente cronología:

- \* **1966.** San Salvador el Seco, Puebla. Se instalaron 2 aerogeneradores y una aerobomba, marca *Borelli*, fabricados en México (capacidad desconocida).
  
- \* **1967.** San Antonio Limón, Ver., Punta Limón, Ver., y La Rumorosa, B.C. En cada lugar se instaló un aerogenerador *Vivarelli* Italiano, de 450 W.
  
- \* **1969.** La Ventosa, Oax., Arriaga, Chih., San Antonio Limón, Ver. (2) y La Rumorosa, B.C. Se instalaron aerogeneradores *Vivarelli* de 450 W.
  
- \* **1971.** Ciudad Guzmán, Chih., San Antonio Limón, Ver., y La Rumorosa, B.C. Se instalaron aerogeneradores mexicanos *Borelli*. Ese mismo año, en La Rumorosa, B.C. y Punta Limón, Ver., se instalaron aerogeneradores *Dunlite*, australianos de 2000W, y en La Caimanera, Gro., un *Dunlite* de 630 W.
  
- \***1975.** Ese año, el IIIE negoció con los Institutos de Ingeniería y Geofísica de la UNAM, la evaluación del recurso energético eólico en México, haciendo énfasis en la Electrificación Rural. Ese mismo año, CFE a través de la Gerencia General de Operación y el IIIE, construyó la Estación Experimental de El Gavillero, Hgo., para llevar a cabo la experiencia de electrificar una comunidad, cuya red eléctrica ya existente, sería alimentada por un inversor

de 5 kW con la energía proveniente de un banco de baterías, que se cargaban con dos aerogeneradores *Dunlite* de 2 kW.

En febrero de 1977, CFE cede al IIE dicha estación experimental, y el experimento se realiza por simulación, ya que el inversor no soportaba cargas por encima de 1,5 kW. La simulación mostró que los patrones estacionales de consumo y generación eran prácticamente inversos, en verano sobraba energía y faltaba en invierno.

### **3.2 Actividades en el Instituto de Investigaciones Eléctricas**

En México, el desarrollo de la tecnología de conversión de energía eólica a electricidad, se inició con un programa de aprovechamiento de la energía eólica en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) en febrero de 1977, cuando la Gerencia General de Operación de Comisión Federal de Electricidad, cedió al IIE la Estación Experimental Eoloeléctrica de El Gavillero, en las cercanías de Huichapan, Hidalgo, donde se pretendía energetizar el ejido ya electrificado y con servicio, a partir de una microcentral eólica, integrada por dos aerogeneradores australianos *Dunlite* de 2 kW cada uno, un banco de baterías, y un inversor de 6 kW para alimentar la red de distribución del poblado. El inversor, construido por personal de CFE, fallaba arriba de los 2 kW de demanda por problemas de calidad de componentes, por lo que físicamente no pudo realizarse el experimento, sin embargo, estando instrumentado el sitio, se tenían los promedios horarios de velocidad del viento y al conocerse las características de respuesta de los aerogeneradores era posible estimar numéricamente la energía que podría suministrarse al ejido. El régimen de vientos del lugar producía exceso de energía en verano y déficit en invierno para el consumo normal del poblado.

La Estación Experimental de El Gavillero se habilitó como centro de prueba de pequeños aerogeneradores y en ella se construyó además un simulador de pozo de agua para la prueba y caracterización de aerobombas. La estación estuvo en operación hasta 1996 en que fue desmantelada.



El IIE desarrolló y probó en El Gavillero, los siguientes prototipos de aerogeneradores:

1. De 1,5 kW, tres aspas de aluminio, con control centrífugo de ángulo de ataque (1977-1978).
2. El Fénix, de 2 kW, eje horizontal y tres aspas fijas de lámina de hierro, y control de cola plegable (1981-1983).
3. El Albatros I, de 10 kW, eje horizontal, 11 m de diámetro, tres aspavelas de estructura de Al y forradas de tela de dacrón de alta resistencia (1981-1985).
4. El Albatros II, de 10 kW, eje horizontal, tres aspas de fibra de vidrio súper delgada con control por torcimiento del aspa (1986-1987).
5. La segunda versión del Fénix, con tres aspas de fibra de vidrio (1992-1995).
6. La Avispa, de 300 vatios, eje horizontal, tres aspas de fibra de vidrio y control por timón de cola plegable (1990-1995).
7. También se desarrolló una aerobomba mecánica, denominada "ITIA", de eje horizontal, 5 aspas metálicas, con potencia del orden de 1/4 de HP, que bombeaba agua de pozos de hasta 50 m de profundidad. Este sistema, probado también en El Gavillero, en el simulador de pozos, fue objeto de una patente para el IIE, y aunque se concedió licencia para su fabricación y comercialización, la carencia de un mecanismo de financiamiento de riesgo compartido, la dificultad para la creación de la red de distribución y servicios, como la falta de financiamiento a los usuarios potenciales, impidió su diseminación.

Las características de los aerogeneradores y su desarrollo se describen a continuación:

En 1978, un aerogenerador de 1,5 kW con rotor horizontal de tres aspas de lámina de aluminio, que tenían control del ángulo de ataque para regular la potencia entregada. Después de las pruebas de caracterización, que resultaron satisfactorias y corroboraban las expectativas de diseño, estando parado, frenado y con las aspas amarradas a la torre, un

gran remolino lo impactó arrancándole dos aspas y destruyéndolas. Los exámenes posteriores evidenciaron un error en los procedimientos de soldadura en atmósfera inerte en el soporte rotatorio del mango del aspa. Dicho prototipo no fue reconstruido al evidenciarse problemas de suministro de componentes y materiales, así como del control de calidad en los procesos de fabricación.

Con la experiencia adquirida, se inició el diseño y desarrollo de un aerogenerador de 2 kW denominado Fénix -por el ave que resurge de sus propias cenizas- de tres aspas fijas de lámina de hierro, el que sometido a pruebas y mejoras, evolucionó a tres aspas de fibra de vidrio de alta eficiencia aerodinámica, generador trifásico de imanes permanentes y sistema de control a base de timón de cola plegable, que lo mismo limita la potencia que lo inhabilita para condiciones de vientos extremos. Este pequeño aerogenerador es capaz de proporcionar del orden de 250 kWh por mes, lo que permitiría energizar una vivienda rural con todos los servicios eléctricos usados responsablemente. Este aerogenerador es también objeto de trámites de patentes y su transferencia a la industria está disponible.

El Albatros I constituyó el mayor aerogenerador desarrollado en México, de 10 kW de potencia eléctrica, con base en generador de imanes permanentes de 28 polos y rotor de tres aspas de 11 metros de diámetro. Fue concebido para operar como aerobomba eléctrica, accionando en régimen de velocidad variable, una bomba eléctrica convencional, sumergida o vertical, de 7,5 a 10 HP, accionada con corriente trifásica a 220 voltios y frecuencia de 40 a 80 ciclos/segundo, dependiendo de la velocidad del viento. Del Albatros I se desarrollaron dos versiones, la aerobomba mecánica, con mecanismo de carrera variable, para optimizar el aprovechamiento de la energía eólica en bombas de émbolo, y la eléctrica, trabajando en régimen de velocidad variable en la bomba, con el mismo fin, mejorar la eficiencia.

Este desarrollo se inició con el apoyo económico y asesoría de VITA (*Volunteers in Technical Assistance*), organización no lucrativa de divulgación técnica de los Estados Unidos para países en vías de desarrollo, que recibió financiamiento de la Fundación General Electric para este proyecto. Los trabajos posteriores en el Albatros II, y el ITIA se realizaron con fondos proporcionados por el Programa Mar del Plata de la Organización de Estados Americanos (OEA). Este financiamiento en periodo de devaluaciones permitió habilitar un taller móvil y la construcción de un túnel de viento en la sede del IIE en Temixco, Morelos.

Durante las pruebas de la versión eléctrica del Albatros I en El Gavillero, vientos enrachados estando en operación, provocaron la fractura de la estructura de aluminio de una aspavela, partiéndose a la mitad. La estructura del aspavela falló por errores en el proceso de soldadura al recalentar el larguero principal y degradar sus características de resistencia a la tracción, fracturándose con el esfuerzo. El dacrón importado, de alto costo y las dificultades constructivas de la estructura de la aspavela, llevó a reconsiderar el diseño del rotor.

El Albatros II, se desarrolló también alrededor del concepto de la vela, sin usar una tela de alta resistencia, alto costo y de importación, sino un remedo semirígido de fibra de vidrio, en que por torsión del aspa se varían las características aerodinámicas de la misma y se controla y limita la potencia transferida al rotor. Este aerogenerador, mucho más esbelto y sencillo, funcionaba bien en sus primeras pruebas operacionales. Antes de ser instrumentado para su caracterización, ya que en la estación de El Gavillero se probaban simultáneamente otros dos aerogeneradores, -el Fénix de 2 kW y el Colibrí de 5 kW, el único aerogenerador fabricado y comercializado en México desde principios de los 80-, lo impactó un gran remolino, estando parado y frenado, levantando el conjunto de bastidor y rotor, de más de 600 kilos, al menos 30 centímetros para sacarlo del mecanismo de tornamesa, que en la cúspide de la torre de 18 metros permite la orientación del conjunto para darle la cara al viento cuando está en operación. La caída fue catastrófica, ya que el conjunto del rotor, de tres aspas y 11 metros de diámetro, con largueros de aluminio, fue totalmente destruido.

El financiamiento a estos desarrollos fue suspendido por la OEA, ya que ésta consideraba que por el desarrollo alcanzado, éste debía provenir de la industria mexicana. Esta apreciación, que fue correcta en teoría, pero inviable en un país que carece de tradición de desarrollo tecnológico-industrial, puso fin al diseño y construcción de aerogeneradores de potencia. El IIE elaboró los anteproyectos de un aerogenerador de 50 kW y de otro de 100 kW para ser montado en las inmediaciones de la estación de El Gavillero junto a un pozo profundo donde se instaló una bomba de 100 HP, proyecto que careció de respaldo económico para su ejecución.

Los recortes presupuestales obligaron a concentrarse nuevamente en pequeños aerogeneradores, desarrollándose el Avispa, de 300 W, utilizando un alternador de automóvil, el que producido industrialmente con un generador de imanes permanentes sería

nominalmente de 500 W. El Avispa resume la experiencia de más de una década diseñando, construyendo y probando aerogeneradores. Desde su diseño se consideraron tres criterios básicos, su confiabilidad y su reproducibilidad industrial a bajo costo. Este aerogenerador fue objeto de patentes, por soluciones novedosas en los mecanismos de control y ensamble. El Avispa, equivalente a seis paneles fotovoltaicos de 50 W pico, permitiría en una vivienda rural energizar el alumbrado con lámparas fluorescentes compactas, el radio durante el día y una televisión en la noche, así como un pequeño refrigerador, ya que proporcionaría del orden de 50 kWh al mes, en condiciones adecuadas de viento (5 m/s de promedio anual).

En el IIE se desarrolló también un pequeño aerogenerador de 50 W de 90 centímetros de diámetro, cuyo objetivo inicial era la recarga de las baterías automotrices usadas en energizar los anemómetros electrónicos con los que se realizaban los estudios del viento en los sitios de interés. Los anemómetros requerían al cabo de un mes de mediciones continuas que se reemplazaran las memorias y la batería por una recién cargada. La instalación de un pequeño aerogenerador en el mástil de los anemómetros mantendría permanentemente un nivel adecuado de carga en la batería. El desarrollo de la electrónica de estado sólido permitió diseñar anemómetros electrónicos de muy bajo consumo eléctrico, siendo suficiente un par de pilas alcalinas para sustituir la batería automotriz.

El Instituto de Investigaciones Eléctricas ha sido la única institución que por veinte años mantuvo, con muchas vicisitudes y altibajos, una ruta consistente de desarrollo de sistemas conversores de energía eólica, lo que se complementó con el desarrollo de anemocinemógrafos electrónicos, sistemas de prueba y adquisición de datos, un túnel de viento con un sistema de adquisición de datos en tiempo real, un laboratorio móvil de meteorología eólica, un taller móvil y la estación experimental de El Gavillero, Hgo.

### 3.3 Diseminación tecnológica de SCEE en México

#### 3.3.1. Fabricantes Establecidos

##### **Molinos de Vientos, S.A.**

A principio de la década de los setentas, se estableció en la capital del estado fronterizo de Chihuahua la empresa "Molinos de Viento, S.A." (MOVISA), que bajo licencia de *Dempster* de los EUA fabricaba las aerobombas metálicas multipalpas. Hacia 1977 establecimos contacto con MOVISA y por esas fechas el 80% de sus ventas correspondía a la fabricación de repuestos industriales y servicios a otras fábricas. Prácticamente la totalidad de su producción se exportaba a los EUA.

En 1986 se liquida MOVISA, ya que como fábrica de aerobombas nunca logró las metas esperadas. Consideramos que esto se debió a las siguientes razones:

- 1.- Aun cuando se disponía de un producto de reconocido prestigio, su uso intensivo de materiales ocasionaba un precio por encima del que la mayoría de los usuarios potenciales estaba dispuesto o podía pagar.
- 2.- La empresa orientó un primer esfuerzo de comercialización hacia programas institucionales en la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, sin lograr resultados. Es de hacerse notar que por esos años el Gobierno Federal estableció un programa de apoyo a la producción agrícola y pecuaria, denominado SAM (Sistema Alimentario Mexicano) que, entre otras acciones, financiaba con créditos blandos la adquisición de maquinaria agrícola, sujetos a condiciones ventajosas de adquisición, no incluyó aerobombas de ningún tipo.

El hecho de no considerar a una aerobomba como equipo o implemento agrícola mostró una actitud oficial de menosprecio o ignorancia hacia estas tecnologías, así como una estructura organizativa formal, donde tecnologías "innovadoras" no tienen cabida en los programas de trabajo establecidos.

## **Potencia Industrial, S.A.**

La compañía Potencia Industrial S.A., miembro del Grupo Fuerza, Industrias Eléctricas S.A., fabrica desde 1977 el aerogenerador Colibrí, conocido en el mercado norteamericano como *Hummingbird*. Este aerogenerador, con una potencia máxima de 6 kW, tiene un generador síncrono de imanes permanentes y trabaja en régimen de velocidad variable. El equipo se vende en dos configuraciones de sistema: para aplicaciones aisladas, con banco de baterías e inversor; y con inversor síncrono para acoplarse a la red eléctrica.

Por comunicación directa del gerente, sabemos que en México han vendido 20 sistemas, doce de ellos a la Secretaría de Marina, en tanto que en los EUA habían vendido más de 250 unidades. Nuevamente, el relativo alto costo del sistema -8000 y 10 mil U.S. dlls para el sistema interconectado y el aislado, respectivamente- y la carencia de una red de distribuidores no han permitido una mayor difusión de estos aerogeneradores.

Potencia Industrial ha fabricado lotes de generadores eléctricos para aerogeneradores, incluso con características de isosíncronos de velocidad variable, para sistemas de velocidad variable-frecuencia constante, que es el estándar moderno de la industria eoloenergética.

## **Industrias Módulo Solar, S.A. de C.V.**

Industrias Modulo Solar S.A. de C.V., fue el resultado de la fusión de tres empresas dedicadas a la fabricación de colectores solares y la comercialización de sistemas para calentamiento de piscinas o instalaciones grandes en hoteles, hospitales, etcétera. La integración de las tres y su evolución hacia la fabricación y comercialización de pequeños sistemas energéticos aislados, se inicia con el contrato de transferencia de tecnología, por el cual el IIE otorga la licencia de fabricación de la aerobomba ITIA.

Esta empresa pretendió, basada en su red de distribuidores de colectores solares a nivel nacional, sacar adelante la comercialización de otros productos, entre los que se incluyen la ITIA y paquetes de alumbrado o bombeo con paneles fotovoltaicos, sin embargo, problemas

de financiamiento y lo relativo a integrar una verdadera red de proveedores de servicios impidió su cristalización. Nuestra apreciación inicial sobre el posible éxito de estos esfuerzos radica en el proceso de capacitación y difusión tecnológica entre el personal de los distribuidores. Esto no se logrará de manera inmediata, pero consideramos que es el único camino para el fabricante de pequeños sistemas conversores de energías renovables y no convencionales.

### **3.3.2 Promoción Industrial por parte del IIE**

#### **Antecedentes**

Después de la primera experiencia en el desarrollo de prototipos de pequeños sistemas conversores de energía eólica, junto con el desarrollo del ITIA se trabajó en dos prototipos adicionales: los aerogeneradores Fénix de 1 kW y el Albatros de 10 kW. Ambos fueron construidos y probados, fueron concebidos alrededor de estos principios: minimización del peso por unidad de área útil, sencillez de fabricación, materiales de norma en la extensión posible, y fabricación industrial con estricto control de calidad.

Estos prototipos surgieron de nichos de mercado potenciales según se indica a continuación:

#### Aerogenerador Fénix 1kW

- \* Telemetría
- \* Telecomunicaciones
- \* Alumbrado, radio, televisión y refrigeración doméstica rural
- \* Electrificación de cercas
- \* Bombeo, de agua para uso doméstico

#### Aerogenerador Albatros 10 kW

- \* Bombeo de agua potable comunitaria
- \* Pequeña irrigación

- \* Bombeo de agua para usos de industrias agropecuarias
- \* Producción aislada de hielo
- \* Sistemas de compresión de aire para pequeña minería

El Albatros fue destruido por el paso de un remolino, estando aún en pruebas respecto al comportamiento aerodinámico y estructural del rotor, así como del sistema de control. Un remolino levantó la carcasa de la tornamesa de soporte y el conjunto se estrelló contra el suelo. Este rotor, de 11 m de diámetro, fue configurado sobre el concepto de un aspa muy delgada -prácticamente una vela rígida- con un sistema de control basado en la flexión torsión de la raíz del aspa, mediante un mecanismo semejante al de la botavara de un velero. Durante las pruebas efectuadas el comportamiento del aerogenerador fue satisfactorio.

Se trabajó también en los diseños conceptuales y arquitectónicos, de los siguientes aerogeneradores:

#### Aerogenerador 50 kW

- \* Mismas que el anterior
- \* Sistemas híbridos diesel/eólicos

#### Aerogenerador 100 kW

- \* Sistemas híbridos diesel/eólicos
- \* Generación eléctrica distribuida
- \* Centrales eoloeléctricas
- \* Sistemas de bombeo/drenaje agrícola



### **3.4 Evaluación del mercado de aerogeneradores integrados al Sistema Eléctrico Nacional**

La contribución de los aerogeneradores de mediana capacidad al propio Sector Energético constituye la aplicación más importante de los mismos. Esta contribución se contempla bajo tres configuraciones:

- a) Sistemas aislados híbridos, en donde una o más diferentes tecnologías se complementan con aerogeneradores para proporcionar energía a comunidades o actividades industriales.
- b) Generación distribuida, en la que aerogeneradores solos o en pequeños conjuntos aportan energía eléctrica a circuitos de distribución, desplazando el consumo de combustibles o agua en hidroeléctricas.
- c) Centrales eoloeléctricas, en donde grandes conjuntos de aerogeneradores aportan energía a líneas de transmisión, ahorrando combustibles y agua, y proporcionando a la vez una fracción de la capacidad instalada como aporte de una capacidad al sistema.

Bajo estas configuraciones, la aportación eólica al sistema eléctrico puede ser al menos del orden del 20% de la capacidad instalada, sin que la intermitencia del viento induzca inestabilidad al sistema. En la medida en que esta generación está más distribuida geográficamente, su aportación energética es más uniforme. Este mínimo de contribución energética eólica, el mercado potencial en México se considera de 5 mil MW para el año 2012, y para América Latina en su conjunto del orden de 20 mil MW.

El estudio de mercado para el Sector Eléctrico Mexicano se basó en la información relativa al viento sobre el territorio nacional, derivada de la red anemométrica del Servicio Meteorológico Nacional y mediciones del IIE, así como del documento "Desarrollo del Mercado Eléctrico" que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) publica anualmente y que contempla proyecciones de los siguientes 10 años, a nivel de zona de distribución.

Estas proyecciones se basan tanto en las tendencias históricas observadas, como en la inclusión de cargas importantes -Grandes Industrias, parques industriales, sistemas de riego agrícola por bombeo, acueductos con bombeo, etc.- cuya realización requiere de un período relativamente largo de maduración. De esta manera la información precedente nos indica geográficamente las regiones más ventosas, y los consumos esperados en esas regiones, identificando así los puntos de interés eoloenergético y la capacidad instalada que absorbería el sistema eléctrico.

### **3.5 Promoción para la fabricación de aerogeneradores de mediana capacidad en México**

Además del análisis del mercado potencial para aerogeneradores integrados al sistema eléctrico, fue necesario evaluar paralelamente también la factibilidad técnico-económica de la generación eoloeléctrica en México. El primer paso fue la instalación de la red anemométrica en el sur del Istmo de Tehuantepec, en los alrededores de la población llamada "La Ventosa". Esta región, conocida como una de las más ventosas en México, cubre un área de aproximadamente 1500 km<sup>2</sup>, donde el viento presenta inusitada intensidad, principalmente en los meses de otoño e invierno.

La medición detallada en esta región permitió simular en 1986, a partir del histograma de duración de velocidades, la producción eléctrica de diferentes modelos comerciales de aerogeneradores. Se estudiaron modelos en el intervalo de 50 a 100 kW y se determinaron los factores de planta anuales esperados en los sitios de medición.

Para estimar el costo por kWh producido, originalmente se consideraron cuatro escenarios de costo por kW instalado: 800,1000, 1200 y 1400 U.S. Cy. (1985), y se comparó con los costos por unidad de energía de otras tecnologías como hidroeléctricas, termoeléctricas, carboeléctricas y geotermia. Se trabajó según los lineamientos metodológicos surgidos por CFE y actualizados anualmente en el documento "Costos y parámetros de referencia para la formulación de proyectos de inversión en el Sector Eléctrico; Generación".

De estos análisis, quedó claro que la viabilidad económica de un proyecto eoloelectrico dependía de tres parámetros: el factor de planta anualizado, dependiente de las condiciones eólicas del sitio, el costo por kW instalado, cuya reducción fundamental depende de ser un producto de fabricación nacional, y por último de los precios internacionales del petróleo, que determinan el costo del kWh termoeléctrico y la viabilidad de la energía eólica para desplazar hidrocarburos.

Fue necesario elaborar un anteproyecto de aerogenerador de 100 kW con base en productos fabricados en México, y cotizarlo en lotes de 100 unidades, para evaluar su costo combinado de partes y componentes, ensamble y prueba. Asimismo, se elaboró el anteproyecto de una central eoloelectrica de 30 MW para determinar el costo del kW instalado. Estos proyectos nos llevaron a los siguientes costos: \$72 000 U.S. Cy. para el aerogenerador de 100 kW y \$950 U.S. Cy. por kW instalado en una central de 30 MW en el sur del Istmo de Tehuantepec.

Para un costo de kW instalado de \$950 U.S. Cy. y un intervalo para el factor de planta de 30 a 40 por ciento, los costos asociados son de 50 a 40 mills por kWh, costo competitivo cuando el precio internacional del petróleo fuese igual o mayor a \$18 U.S. Cy. por barril, ya que a este precio la fracción por combustible en una termoeléctrica de referencia es de aproximadamente 45 mills/kWh. Para 1990 el umbral de precio del petróleo para que fuese más económica la eólica era de 21 dólares por barril.

Al tener como base lo anterior, se plantearon los requerimientos de infraestructura, equipamiento y personal para una fábrica que ensamblara 4 unidades/día hábil en un turno de trabajo. Cinco de estas ensambladoras, distribuidas en el territorio nacional, podrían cubrir la demanda regional de aerogeneradores según el mercado potencial indicado. Estas plantas ensambladoras integrarían aerogeneradores a partir de partes y componentes que ya producen otras fábricas de la industria eléctrica y metal mecánica, como son generadores eléctricos, cajas multiplicadoras de transmisión, frenos hidráulicos de disco, torres tubulares o reticuladas, coronas dentadas, flechas, coples flexibles, rodamientos industriales, etc. Parte importante del desarrollo tecnológico requerido es el relativo a la optimización de estos componentes para su utilización en aerogeneradores. La otra parte tiene que ver con una concepción arquitectónica del sistema que minimice costos y maximice la confiabilidad.

Para el caso del mercado mexicano se estimó que la producción de 500 MW/año de aerogeneradores significa el uso de 60 mil toneladas de productos finales: generadores, motores, flechas, cajas de transmisión, etcétera, cuyas ventajas para la industria ya establecida significarían del orden de 375 millones de dólares anuales (1985), además del impacto en esas industrias del crecimiento de puestos de trabajo.

### **3.6 Actividades en otras instituciones nacionales**

Al lado de las actividades señaladas, otras instituciones han incursionado en el desarrollo de sistemas conversores de energía eólica, como la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, que desarrolló el EHECATL de 1 kW. Al menos cuatro de estos aerogeneradores fueron instalados en el estado de México y en Puerto Escondido, Oaxaca.

El aerogenerador EHECATL instalado en Puerto Escondido, Oaxaca, estuvo en operación por dos años. Resistió sin problemas al huracán Paulina, pero el edificio del hotel Fiesta Mexicana, sobre el cual se instaló, a los tres días de haber cesado las lluvias y los fuertes vientos del huracán, debido a un problema en su pobre cimentación, y a su ubicación al borde de un desfiladero, se derrumbó, pero el aerogenerador se mantuvo intacto, como pudo apreciarse en fotografía de primera plana del diario La Jornada.

El Instituto de Ingeniería de la UNAM junto con el Centro de Investigaciones Biológicas de Baja California Sur desarrollaron otro prototipo de 1 kW. Las Facultades de Ingeniería de la Universidad Veracruzana y de la Universidad de Zacatecas han realizado como trabajo de tesis prototipos de pequeños aerogeneradores, usando alternadores automotrices.

A mediados de 1994 entró en operación en La Venta, Oaxaca, una central eoloelectrónica de 1 575 kW, constituida por 7 aerogeneradores marca *Vestas* (daneses) de 225 kW cada uno, como resultado de una licitación pública convocada por CFE. Esta central, construida en un lugar donde el IIE realizó mediciones desde 1984 y ubicó el sitio como uno de los más

ventosos en el sur del Istmo de Tehuantepec, presenta factores de planta anuales del orden del 60%, cuando la media en Dinamarca y California es del orden del 25%.

Esta minicentral representa la primera experiencia para CFE de la interconexión de eoloelectricas al sistema eléctrico interconectado.

**INVENTARIO NACIONAL DE AEROGENERADORES INSTALADOS Y EN OPERACIÓN**  
(Mayo 2006)

| <b>LUGAR</b>        | <b>Capacidad unitaria (kW)</b> | <b>Marca y modelo</b> | <b>Capacidad total (kW)</b> | <b>Estado actual</b><br>O = Operación<br>I = Inoperativo |
|---------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------------|--|
| Guerrero Negro, BCS | 1 x 250                        | <i>Mitsubishi 250</i> | 250                         | I  |
| La Venta, Oaxaca    | 7 x 220                        | <i>Vestas 26</i>      | 1540                        | O  |
| Xcalak, Q. Roo      | 6 x 10                         | <i>Bergey 10</i>      | 60                          | I  |
| Diversos            | 15 x 5                         | <i>Colibrí</i>        | 75                          | O  |
| Cancún Q.Roo        | 12 x 0,5                       | <i>Avispa, IIE</i>    | 6                           | Desmantelados  |
| Saltillo, Coah.     | 1 x 500                        | <i>Zond, Z40</i>      | 500                         | Desmantelado   |
| Gerrero Negro, BCS  | 1 x 600                        | <i>GAMESA</i>         | 600                         | O  |
| Isla Margarita, BCS | 2 x 5                          | <i>Colibrí</i>        | 10                          | O  |
|                     |                                | <b>TOTALES</b>        | <b>2 225</b>                | <b>O</b>   |
|                     |                                | <b>Energía/ año</b>   | <b>6 GWh</b>                |  |

ECM/junio 1998-2006, \* Cantidad estimada

## **CAPÍTULO 4**

### **APLICACIONES IMPORTANTES E IMPACTOS POTENCIALES DE LA ENERGÍA EÓLICA EN MÉXICO**

#### **4.1 Potencial de aplicación en México**

La energía eólica tiene dos aplicaciones fundamentales: la generación eléctrica en gran escala como generación distribuida interconectada al Sistema Eléctrico Nacional, y la generación aislada, de pequeña escala (menor o igual a 50 kW) para servicios energéticos autónomos, en lo que en México ha mostrado tener un atraso preocupante.

La asimilación de una tecnología energética emergente corresponde a un proceso político social en el que la correlación de fuerzas se inclina hacia un cambio de paradigma, que hace posible la transición energética. En México esto no se ha dado aún. La conciencia de la necesidad de diversificar los energéticos primarios para generación eléctrica, en un contexto de energías renovables, generación distribuida y administración de demanda, apenas empieza a permearse en un medio donde las inercias son muy grandes. El sector eléctrico a escala mundial es muy reticente a introducir cambios y ha sido a través de coacción gubernamental, de la modificación de leyes y reglamentos, e incluso del establecimiento de sanciones, como se han podido inducir las transformaciones necesarias en el sector eléctrico.

Lo que en este momento se puede esperar es que dados los graves disturbios climatológicos a escala mundial, que se están viviendo como consecuencia del cambio climático originado por actividades humanas, y el sector energético es el principal responsable de ello, se tomen a nivel internacional medidas promocionales para la difusión masiva de tecnologías de generación eléctrica a partir de energías renovables. Si México arrancara un enérgico programa de desarrollo de centrales eoloeléctricas, podría alcanzar la cifra de 5 mil MW para el 2012, aún así para entonces, más de mitad de la generación eléctrica en México sería a partir de combustibles fósiles.

Un programa de esta magnitud, en términos de beneficios ambientales, tendría los siguientes efectos: evitar la instalación de centrales termoeléctricas y por tanto su consumo de agua en el altiplano central para sus sistemas de enfriamiento y las emisiones de gases de efecto invernadero, por otra parte, al no pagar por combustibles, sino por empleos. Dentro del sector energético, el desarrollo de centrales eoloelectricas es lo que produce más empleos, por lo que beneficia también a las comunidades donde se asientan, además la utilización del suelo interfiere marginalmente con los usos agrícolas o de pastoreo, lo cual permite la continuidad de estas actividades y la ganancia de un pago adicional por el arrendamiento de los espacios y derechos de vía para localizar aerogeneradores, tender líneas de interconexión y subestaciones eléctricas.

Sin embargo, la penetración importante de la generación eoloelectrica al sistema eléctrico nacional no queda fuera del contexto de las otras energías renovables y su incidencia en la oferta eléctrica nacional. Por el momento, julio del 2006, no sólo enfrentamos una situación de precios de los combustibles fósiles, donde el petróleo se cotiza a más de 60 dólares el barril, en Estados Unidos y México se subsidia el gas natural, y aún así el costo de generación en centrales de Ciclo Combinado es mayor que el de la eólica, sino que también, los impactos climatológicos catastróficos se incrementan año con año, por efecto del Calentamiento Global, causado principalmente por un modelo energético sustentado en la quema de combustibles fósiles.

Este cuadro general determina la urgencia por transformar nuestro sistema energético y el eléctrico en particular, de una forma decidida y rápida, no solamente por los precios e impactos de los combustibles fósiles, sino porque también el esquema tradicional está agotado. Si analizamos la perspectiva del Sector Eléctrico al 2030 considerando el balance demanda oferta, según el crecimiento poblacional y el desarrollo social esperado, tenemos el siguiente cuadro:

### Escenarios de consumo eléctrico y capacidad instalada al 2030

| AÑO  | Población<br>Millones | Consumo<br>(kWh/hab-año) |       |       | Capacidad<br>(MW) |         |         |
|------|-----------------------|--------------------------|-------|-------|-------------------|---------|---------|
|      |                       | Bajo                     | Medio | Alto  | Baja              | Media   | Alta    |
| 2000 | 100                   | 2 000                    | 2 000 | 2 000 | 40 000            | 40 000  | 40 000  |
| 2010 | 111                   | 2 300                    | 2 500 | 2 800 | 73 000            | 79 000  | 89 000  |
| 2020 | 120                   | 2 600                    | 3 000 | 3 400 | 89 000            | 103 000 | 116 000 |
| 2030 | 127                   | 3 000                    | 3 500 | 4 000 | 109 000           | 127 000 | 145 000 |

Proyecciones de CONAPO, 2006

Factor de Planta medio ponderado de 0,40 para el sistema eléctrico en su conjunto  
4000 kWh/hab-año era el consumo en España al inicio de los años 90

Este es el tamaño del desafío al sistema eléctrico mexicano. Ningún energético primario por sí mismo puede ampliar la oferta en 100 mil MW adicionales para el 2030, si es que queremos salir del subdesarrollo y la parálisis económica en que estamos desde hace 25 años, cuando la propia ONU fijó la meta de los 4000 kWh/hab-año, como un objetivo deseable para los países en vías de desarrollo, en un contexto de uso eficiente.

Este desafío sólo puede enfrentarse, no con un sistema centralizado, sino en red, no con la preponderancia de alguna fuente primaria, sino con la participación de todos los energéticos disponibles y viables, así como la inclusión de una gran variedad de tecnologías y tamaños de procesos de conversión e electricidad. Esto requiere desde modificaciones al marco legal de la industria, como la reestructuración interna de CFE, la adecuación de la CRE, etcétera.

Las adecuaciones legales no pasan por la Constitución, sino por la adecuación de las leyes secundarias que deben adaptarse, dentro del espíritu de la Constitución, a las nuevas realidades tecnológicas y de fuentes primarias de energía, en un contexto de urgencia por la transformación del sector energético en general y el eléctrico en particular. Si consideramos el escenario alto de desarrollo eléctrico, para lograr así los 4 mil kWh/hab-año para el 2030, la evolución de la oferta eléctrica al 2030 debería tener un patrón parecido al mostrado a continuación:



**Escenarios de desarrollo de la capacidad instalada eléctrica  
con énfasis en energía renovables (Escenario alto en MW)**

| <b>AÑO</b>  | <b>Total<br/>(MW)</b> | <b>No<br/>renovables</b> | <b>RENOVABLES</b> | <b>Hidro y<br/>Geotermia</b> | <b>Eólica</b> | <b>Solar</b> | <b>Biomasa</b> |
|-------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|------------------------------|---------------|--------------|----------------|
| <b>2000</b> | <b>40 000</b>         | <b>30 000</b>            | <b>10 000</b>     | 10 000                       | 2             | 0,25         | 250            |
| <b>2010</b> | <b>89 000</b>         | <b>66 000</b>            | <b>23 000</b>     | 15 000                       | 5 000         | 1 000        | 2 000          |
| <b>2020</b> | <b>116 000</b>        | <b>30 000</b>            | <b>86 000</b>     | 20 000                       | 25 000        | 15 000       | 20 000         |
| <b>2030</b> | <b>145 000</b>        | <b>20 000</b>            | <b>125 000</b>    | 25 000                       | 40 000        | 35 000       | 25 000         |

Formuló: E. Caldera. Junio 2006

Los problemas para el desarrollo de este escenario, no son tecnológicos ni económicos ni financieros; son políticos y burocráticos, como ya se ha señalado asimismo en otros países.

#### **4.2 Consumo evitado de agua para enfriamiento de termoeléctricas**

Una de las grandes desventajas de la generación eléctrica vía procesos termoeléctricos en un país semiárido como México, donde el 50% del escurrimiento nacional de agua se concentra en Tabasco, Campeche, el sureste de Veracruz y parte de Chiapas, son los requerimientos de agua en los sistemas de enfriamiento de las plantas termoeléctricas, que deben disipar a la atmósfera como energía térmica el doble de la generada como electricidad.

En la actualidad se consumen del orden de 4 millones de metros cúbicos de agua de pozo por año en el Valle de México para el enfriamiento de las termoeléctricas, que es más necesaria para dotar servicios de agua potable al menos a 10 mil familias. Las termoeléctricas en Salamanca, San Luis Potosí, Lerdo y Gómez Palacio, Dgo., así como en Monterrey, secuestran el agua de pozo que es necesaria para el servicio de agua potable. En conjunto consumieron del orden de 21,35 millones de metros cúbicos en 1994, suficiente para 400 mil habitantes, al haber generado 15 217 GWh.

En conjunto las Regiones Norte, Noreste y Lerma-Balsas, consumieron 105 millones de metros cúbicos de agua en 1994, para una generación termoeléctrica combinada de 97'538 GWh. Este consumo muestra claramente el conflicto actual y la perspectiva a futuro en las alternativas para el uso de un recurso escaso como el agua, en el altiplano del país.

La generación termoeléctrica bruta con combustibles fósiles reportada para 1995, fue de 100 698 GWh, en tanto que la de 1994 fue de 107 633 GWh, lo que resulta en un índice de consumo promedio de 1,402915 litros/kWh. De acuerdo con las expectativas, para el año 2000 se estimó el siguiente consumo:

**Consumo de agua en centrales termoeléctricas para el año 2000, en km<sup>3</sup>**

| REGIÓN                     | Generación<br>media<br>esperada<br>(GWh/año) | CONSUMO DE AGUA DULCE |             |       | ÍNDICE     |
|----------------------------|--|-----------------------|-------------|-------|------------|
|                            |  | Subterránea           | Superficial | Total | Litros/kWh |
| <b>Noroeste</b>            | 23 187                                       | 0,005                 | 0,000       | 0,005 | 0,215638   |
| <b>Norte</b>               | 39 668                                       | 0,087                 | 0,022       | 0,109 | 2.,747807  |
| <b>Noreste</b>             | 29 329                                       | 0,013                 | 0,000       | 0,013 | 0,443247   |
| <b>Lerma -<br/>Balsas</b>  | 28 880                                       | 0,026                 | 0,000       | 0,026 | 0,900277   |
| <b>Valle de<br/>México</b> | 17 936                                       | 0,004                 | 0,000       | 0,004 | 0,223015*  |
| <b>Sureste</b>             | 8 496  | 0,010                 | 0,000       | 0,010 | 1,177024   |
| <b>TOTALES</b>             | 147 496                                      | 0,145                 | 0,022       | 0,167 | 1,132234   |

\*- No considera el uso de 0,057 km<sup>3</sup> de aguas residuales, lo que daría un índice de 3,4 litros/kWh, lo que indica enfriamiento con agua que corre

El sector eléctrico tenía un crecimiento previsto de 14'097,5 MW termoeléctricos, presumiblemente al año 2010, por sobre los 23'140 MW en operación a finales de 1996. Estas previsiones indican una significativa inercia del Sector, al seguir apoyándose en los combustibles fósiles principalmente para responder al crecimiento de la demanda eléctrica. Esto indica también el rezago tecnológico, por cuanto a la utilización de nuevas tecnologías y

el atraso en reglamentar adecuadamente y crear las condiciones propicias para la participación extensiva de los sectores paramunicipales, sociales y privados como permisionarios de generación eléctrica para autoabastecimiento y pequeña producción, así como generación independiente, enfatizando el uso de energías renovables.

Cuando en el resto del mundo las energías renovables, la generación distribuida y la administración de la demanda, se empiezan a utilizar como herramientas básicas para la reestructuración del Sector Eléctrico a largo plazo, en un esquema de desarrollo sustentable que empieza a articularse, México sigue anclado en una visión convencional para el crecimiento de la oferta eléctrica.

De los proyectos mencionados, al menos 4 635 MW están en zonas con problemas actuales de disponibilidad de agua dulce, que para una generación estimada en 24'360 GWh representaría un consumo de agua de 27,3 millones de metros cúbicos por año adicionales, en conflicto con las necesidades futuras de agua potable en mismas zonas, y que quizá sólo fuera posible si se utilizaran aguas residuales en los sistemas de enfriamiento o sistemas de torres secas.

Esta capacidad adicional de termoeléctricas de Ciclo Combinado a gas natural, en zonas críticas por cuanto al suministro de agua de enfriamiento, con tecnologías convencionales, es decir, usando agua dulce de pozo o superficial, es del orden de la capacidad eólica que se estima indispensable desarrollar para diversificar las fuentes de energía primaria, aprovechar renovables y sostener nuestra independencia energética. El desarrollo de al menos 5 mil MW eoloeléctricos al año 2012 se considera una meta viable y necesaria.

#### **4.3 Escenarios de emisiones evitadas, de gases de efecto invernadero**

Con el fin de establecer un escenario de referencia de contaminantes evitados, consideraremos un factor de planta anual ajustado medio de 0,30 lo cual significa una generación bruta anual de 1 314 GWh por cada 500 MW de capacidad eoloeléctrica instalada. La mitigación resultante se muestra en la siguiente tabla:

**Emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas por año y acumulas al 2012  
por generación eoloeléctrica masiva**

| <b>AÑO</b>  | <b>Capacidad final (MW)</b> | <b>Generación eólica anual (GWh)*</b> | <b>CO<sub>2</sub> evitado anual (M ton)</b> | <b>Generación acumulada (TWh)</b> | <b>CO<sub>2</sub> evitado acumulado (M ton)</b> |
|-------------|-----------------------------|---------------------------------------|---|-----------------------------------|---|
| <b>2007</b> | 300                         | 657                                   | 0,23  | 0,6570                            | 0,23  |
| <b>2008</b> | 1000                        | 1 971                                 | 0,69  | 3,5480                            | 1,242   |
| <b>2009</b> | 2000                        | 4 599                                 | 1,61  | 11,4320                           | 4,002   |
| <b>2010</b> | 3000                        | 7 227                                 | 2,53  | 24,5720                           | 8,602   |
| <b>2011</b> | 4000                        | 9 855                                 | 3,45  | 42,9680                           | 15,042  |
| <b>2012</b> | 5000                        | 12 483                                | 4,37  | 66,6200                           | 23,322  |

Se considera un índice de 0,350 kg/kWh de CO<sub>2</sub>, considerando desplazamiento de gas natural

\* Aunque se considera una inclusión anual de 1000 MW, para fines de generación, se cuentan 500 MW únicamente

Si consideramos que para el año 2012 más del 50% de la capacidad instalada seguirá siendo de centrales termoeléctricas, las emisiones evitadas de CO<sub>2</sub> por generación eoloeléctrica, habrán mitigado el orden de un **sexto** de las emisiones totales por generación termoeléctrica. Esta cifra es importante en el contexto de la generación eléctrica nacional, máxime si consideramos el efecto acumulativo de las emisiones de gases de efecto invernadero, y por lo tanto el efecto agregado de las emisiones evitadas.

#### **4.4 Resumen de agua dulce y emisiones evitadas por generación eoloeléctrica**

La instalación de 5 mil MW eoloeléctricos al año 2012, a razón de 1000 MW por año, implicaría para el 2013 una generación anual de 13 140 GWh de origen eólico, lo que evitaría por año consumir 17,4 millones de metros cúbicos de agua y lanzar a la atmósfera 4,6 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, considerando únicamente el desplazamiento de gas natural.

El desarrollo de la capacidad de generación eléctrica con ciclos combinados a base de gas natural, puede ir montando la capacidad instalada para utilizar hidrógeno como combustible, ya que capacidad adicional de generación eléctrica con energía eólica, solar y oceánica (olas, maremotriz y de corrientes) dada su naturaleza no despachable, sí pueden ser ampliamente utilizadas para generar hidrógeno vía procesos electrolíticos, el que bombeado al altiplano será fuente de energía y agua potable. El esfuerzo tecnológico industrial para la instalación de 5 mil MW eólicos al año 2012, no terminaría ahí, sino que sentaría las bases para continuar con un mayor énfasis, si consideramos que el tope de capacidad instalada eoloeléctrica, a mediados del siglo, será del orden de la capacidad total instalada a la fecha en el Sistema Eléctrico Nacional, es decir, alrededor de 50 mil MW.

## **4.5 Proyecciones tecnológicas**

### **4.5.1 Reducción de Costos**

El factor determinante en el costo de un aerogenerador de potencia moderno, es decir, igual o mayor a 500 kW, radica en el peso asociado a cada kW instalado, lo cual significa materiales utilizados, metales, resinas, plásticos, etcétera. Un aerogenerador *Vestas V66* de 1,65 MW pesa 180 toneladas y su índice de peso por kW es de 47,27 kg/kW. El proyecto del *Aerodyn* alemán de 5 MW, 100 m de diámetro de rotor y 200 toneladas de peso implica un índice de 31 kg/kW.

Ya que el área circunscrita por el rotor es función del cuadrado de su radio, un incremento de 50% en la longitud de las aspas, significa un aumento de 2,25 veces en el área de captura de energía eólica, por lo que la economía de escala de la conversión eoloeléctrica está asociada a rotores cada vez más grandes. Esto tiene dos grandes limitaciones, la resistencia estructural y el peso de aspas de más de 20 m, así como de la capacidad de las grúas para realizar las operaciones de montaje. El rotor ensamblado del V66 de 1,65 MW pesa 23 toneladas y debe subirse a 40 ó 50 m de altura. El rotor del *Aerodyn* de 5 MW pesa 45 toneladas y al menos estará a 70 m de altura.

## **Estructura de costos de inversión**

El costo resultante de la generación eléctrica con energía eólica es muy sensitiva a tres cosas fundamentalmente. La primera es el sitio de instalación y la calidad de la energía eólica del mismo, esto determina el factor de capacidad esperado, más los costos de instalación de los aerogeneradores dadas las características topográficas y de acceso al sitio. Por otra parte, son los costos totales del equipamiento puesto en el lugar, considerando precio de fábrica, fletes, seguros y aranceles. Por último, el costo financiero del dinero con el que se efectuó el proyecto.

La economía de las centrales eoloeléctricas se basan en tres aspectos: una buena selección y caracterización eólica del sitio de explotación, integración nacional de la fabricación de los aerogeneradores y un esquema de financiamiento blando. Bajo estas condiciones, aerogeneradores en el intervalo de 600 a 750 kW tienen un costo del orden de \$1000.00 US Cy por kW instalado. La tendencia a máquinas de mayor capacidad y tamaño, que en el 2005 promediaban una capacidad unitaria de 1,5 MW, reporta costos del orden de 1 150 Euros por kW instalado.

La economía de los aerogeneradores no sólo estriba es esos costos, sino en otros factores a considerar. Para producir un millón de kWh/año, un aerogenerador ocupa solamente 25 m<sup>2</sup>, los paneles fotovoltaicos una hectárea, y del orden de 100 hectáreas de bosque para cosechar biomasa y producir la misma energía.

Un aerogenerador recupera en dos a tres meses la energía invertida en su fabricación, instalación, mantenimiento y desmantelamiento al final de su vida útil. Por último, habría que agregar que una central eoloeléctrica no emite gases de ningún tipo, no requiere agua para ningún sistema de enfriamiento e interfiere mínimamente con su entorno físico natural.

## **Estructura de costos de operación y mantenimiento**

Los costos de operación y mantenimiento corresponden al 2 a 3% por año del costo de la turbina, lo que da costos promedio de O y M del orden de 1 US cent/kWh para resultar en un

costo total del orden de 0,05 US Cy/kWh en sitios con factores de planta anualizados de 0,25 a 0,30. En los mejores sitios, con factores de planta mayores a 0,30 y menores costos financieros y de infraestructura, los costos son cercanos a los 0,04 US Cy.

Un elemento del costo de operación de una central eoloelectrica lo constituye la renta del terreno donde se asienta la central. Ya que ella no cambia el uso tradicional del suelo, las actividades agrícolas en terrenos planos pueden continuar con una merma del suelo arable del orden de 3 a 4%, ocupada por las cimentaciones, transformadores y derechos de vía. En terrenos complejos con actividad de pastoreo esto no se ve afectado. Instalar aerogeneradores implica cosechar también kWh, por lo que a los dueños del terreno se les retribuye con una fracción de la energía generada, como renta, o derechos de uso del viento, que oscila alrededor del 2%.

### **Tendencias Históricas**

Es de esperarse que con la nueva generación de aerogeneradores en uso de mil a 1650 kW por unidad, la reciente introducción de unidades de más de 2 MW y aún mayores en pruebas, los costos típicos de generación estén por los 0,04 US Cy/kWh, y en sitios privilegiados en el orden de los 0,03 US Cy/kWh. Un reciente estudio realizado en Europa, copatrocinado por Greenpeace, la Asociación Europea de Energía Eólica (EWEA) y el Foro sobre Energía y Desarrollo de Dinamarca, realizado por la firma BTM Consult de Dinamarca, prevé el siguiente desarrollo de la industria mundial de aerogeneradores para el año 2010:

**Inversiones, instalaciones y empleos por centrales eoloeléctricas en el mundo  
(Unidades de inversiones en miles de millones de US\$)**

| <b>AÑO</b>  | <b>Instalaciones<br/>MW/año</b> | <b>Costos<br/>US\$/kW</b> | <b>Inversiones<br/>US\$/año</b> | <b>Inversión<br/>acumulada</b> | <b>Empleos<br/>puestos/año</b> |
|-------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| <b>1998</b> | 2 600                           | 1 000                     | 2,60                            | 2,60                           | 57 200                         |
| <b>1999</b> | 3 120                           | 975                       | 3,04                            | 5,64                           | 66 910                         |
| <b>2000</b> | 3 744                           | 948                       | 3,55                            | 9,19                           | 78 126                         |
| <b>2001</b> | 4 493                           | 921                       | 4,14                            | 13,33                          | 91 062                         |
| <b>2002</b> | 5 391                           | 897                       | 4,83                            | 18,166                         | 106 352                        |
| <b>2003</b> | 6 470                           | 871                       | 5,64                            | 23,802                         | 123 991                        |
| <b>2004</b> | 8 411                           | 852                       | 7,17                            | 30,966                         | 157 612                        |
| <b>2005</b> | 10 934                          | 830                       | 9,075                           | 40,038                         | 199 582                        |
| <b>2006</b> | 14 214                          | 810                       | 11,51                           | 51,546                         | 253 170                        |
| <b>2007</b> | 18 478                          | 787                       | 14,54                           | 66,086                         | 319 882                        |
| <b>2008</b> | 24 021                          | 762                       | 18,31                           | 84,384                         | 402 551                        |
| <b>2009</b> | 31 228                          | 734                       | 22,93                           | 107,319                        | 504 580                        |
| <b>2010</b> | 40 596                          | 705                       | 28,64                           | 135,959                        | 630 084                        |

Fuente BTM Consultores, Dinamarca. Sep. 1999

Durante el año 2005 se instalaron 11 769 MW, 43% más que en 2004 en que se instalaron 8 207 MW, cumpliéndose adecuadamente las proyecciones de 1999, lo que significa que para fines del 2005 existían del orden de 200 mil empleos ligados al desarrollo de la generación eoloeléctrica.

Los Laboratorios *Riso* de Dinamarca reportaron en 1995 que los costos de la generación eoloeléctrica habían descendido de US 16,9 cents/kWh en 1981, a 6,15 en 1995. Con las máquinas de 750 kW los costos habían descendido a 4,7 US cents/kWh y se espera la siguiente desescalación: 4 centavos para el 2005, 3,6 centavos para el 2010, debajo de 3 centavos para el 2013, reduciéndose a 2,5 para el 2020. Estos costos se han evaluado considerando una mejora en el factor de planta de 0,23 actual a 0,27 en el 2020, para condiciones medias en Dinamarca. El factor de planta medio en La Ventosa Oax., estará en



el orden de 0,50 a 0,60 y en el centro norte del país entre 0,30 y 0,35 por lo que en nuestro país, las condiciones de competitividad con centrales de Ciclo Combinado se alcanzarán mucho antes.

#### 4.5.2 Generación de empleos y actividad económica conexas

La energía eólica paga empleos, no combustibles. Un estudio de 1998 de la Asociación Danesa de Fabricantes de Aerogeneradores (DWTMA) reporta las siguientes cifras:

|                |                  |
|----------------|------------------|
| 17 hombres-año | por MW fabricado |
| 5 empleos-año  | por MW instalado |

Un estudio anterior de la Comisión de Energía de California ubicaba los empleos directos e indirectos por Operación y Mantenimiento, así:

|                   |                                |
|-------------------|--------------------------------|
| 450 empleos/TWh   | Para Operación y Mantenimiento |
| 1 500 Empleos/TWh | Como indirectos                |

En un estudio realizado por *BTM Consult* para la EWEA, Greenpeace y el Foro para la Energía y el Desarrollo de Dinamarca, sus proyecciones para América Latina, considerando su despegue en el 2002, fueron de una capacidad instalada de 90 mil MW para el año 2020, sobre la base de un desarrollo mundial en que para ese año, el 10% de la energía eléctrica mundial sea producida por el viento, lo que implica una capacidad mundial instalada de 1 millón 200 mil MW eólicos. La generación de electricidad con energía eólica constituye la actividad de explotación de una energía renovable que mayor impacto social tiene, al significar una muy importante fuente de empleos en el futuro, se estima que para el año 2020 alrededor del mundo habrá 1 millón 723 461 personas laborando directamente en este campo.

La apertura del Sector Eléctrico a la participación privada, social, y paramunicipal a la generación eléctrica para autoabastecimiento, cogeneración y pequeña producción independiente, permitirá efectivamente la inclusión masiva del aprovechamiento de fuentes

renovables de energía, cuyo carácter difuso y de baja densidad, las hacen adecuadas para las explotaciones distribuidas, orientadas básicamente a la solución de problemas de abasto energético local. Sólo la masividad de estos aprovechamientos les puede dar sentido en términos de oferta nacional de energía, y en el caso particular de la energía eólica, sólo la masividad y dispersión de las centrales eoloeléctricas, integradas al Sistema Nacional Interconectado, puede tener sentido en términos de aportación confiable de energía y capacidad al Sistema Eléctrico Nacional.

Por lo anterior, el escenario de penetración eoloeléctrica a considerar, es el único con racionalidad energética, técnica y económica: el de llevarla al menos al 20% de la capacidad instalada del Sistema Eléctrico Nacional. Lograr esta penetración para el año 2020, requiere de un esfuerzo extraordinario, tanto industrial para la construcción de partes y componentes, así como de exploración, caracterización y evaluación de sitios de explotación, y finalmente el proyecto, construcción y montaje de centrales eoloeléctricas a razón de 1000 MW por año, desde el 2008. Esto implica que, de 2007 al 2008, se tomen todas las provisiones legales, reglamentarias, fiscales, financieras, normativas, de tarifas, ambientales, operacionales, institucionales, y fundamentalmente estratégicas y de planeación, para que esto pueda ser posible.

## CAPÍTULO 5

### PERSPECTIVAS DE DESARROLLO DE LA ENERGÍA EÓLICA EN MÉXICO

#### 5.1 Potencial eoloeléctrico en México

Para hablar correctamente de un potencial energético, deberemos utilizar un lenguaje que sea compatible con el de los planificadores energéticos. Al tratar de establecer una analogía con la metodología para evaluar potenciales hidroeléctricos dentro de cuencas hidrológicas, se establecieron los conceptos de “Potencial Bruto de Superficie” y “Potencial Técnico”. En una zona definida, la mecánica del viento existente determina la presencia de uno o más rumbos de vientos energéticos. Estos rumbos determinan la geometría, orientaciones y separaciones en la instalación de filas de aerogeneradores en una central eoloeléctrica, y por tanto el número y capacidad de los que se pueden instalar en la zona en estudio, lo cual resulta en una capacidad instalable en MW y un pronóstico de energía generada anualmente en GWh para cada sitio de posible explotación.

El Potencial Bruto de Superficie significaría en principio el límite máximo teórico del potencial aprovechable, esto hace que se consideren varias restricciones en su evaluación, las primeras son la accesibilidad por caminos y líneas eléctricas a los sitios, no pudiendo quedar más allá de  $n$  kilómetros de la infraestructura existente. También operan restricciones sociales, ambientales, históricas, escénicas, etc., que definen las regiones de explotación probable. Bajo este conjunto de restricciones se realiza la estimación preliminar del Potencial Aprovechable.

Dada la orografía y topografía de México, donde predominan los terrenos complejos, por razones de logística de montaje, operación y mantenimiento, son recomendables aerogeneradores de potencia no superior al MW. Un aerogenerador comercial de 850 kW, para lugares con vientos no muy fuertes, tiene una torre de 44 a 71 m de altura y un rotor de 58 m de diámetro, con un área barrida de captura de energía del viento de 2642 m<sup>2</sup>. Una separación de 10 diámetros entre ellos significa una distancia de 580 m entre cada uno. En una configuración de “tresbolillo”, con la mencionada separación entre aerogeneradores (diez diámetros) el ‘área territorial’ que corresponde a cada uno de ellos es de 25,23 has, y en un

km<sup>2</sup> cabrían 3,96 aerogeneradores de 850 kW, lo que significa una densidad de potencia instalada de 3'369 MW/km<sup>2</sup>. Utilicémoslo como ejemplo:

Supongamos que el territorio nacional es una enorme llanura como Dinamarca; con dos millones de km<sup>2</sup> cabrían entonces:

$$2\ 000\ 000 \times 3\ 369 = 6\ 738\ 000 \text{ MW (Teórica)}$$

Si consideramos que por razones orográficas y topográficas el 50% fuese inaccesible para su explotación eólica, tenemos entonces:

$$3\ 369\ 000 \text{ MW (Potencial Bruto de Superficie)}$$

Pero si pensamos en que por otros usos del suelo y áreas protegidas esta superficie explotable se reduce a la mitad, tenemos así:

$$1\ 684\ 500 \text{ MW (Potencial Disponible)}$$

Pero no requerimos únicamente áreas con energía eólica disponible, necesitamos también que sean accesibles, es decir que no estén demasiado lejos de carreteras y líneas eléctricas, para poder integrar esa energía eléctrica al Sistema Eléctrico Nacional, estimemos pues que sólo el 50% de esa área es aprovechable, es decir:

$$842\ 250 \text{ MW (Potencial Eólico Aprovechable)}$$

Este potencial es del mismo orden de magnitud que el total de capacidad instalada de generación eléctrica de los Estados Unidos en la actualidad.

El punto a determinar es el Potencial Técnico, es decir, lo que el sistema eléctrico puede asimilar como generación eólica interconectada. Consideremos el año 2030, México tiene 125 millones de habitantes y el consumo eléctrico per cápita es de 4500 kWh/hab-año, equivalente al actual consumo en Corea del Sur, o el que tenía Irak antes de la llamada Guerra del Golfo, en la que Estados Unidos destruyera su infraestructura.

El consumo será por tanto  $4500 \times 125\,000\,000 = 562\,500$  GWh, lo que implica una capacidad instalada de 160 530 MW. Si de ese total el 25% fuesen eólicas, en números redondos serían 40 mil MW, lo que significa que el potencial aprovechable es 21 veces mayor que el asimilable al 2030. Así, 40 mil MW eoloeléctricos interconectados al Sistema Eléctrico Nacional, significa aprovechar sólo 11 873 km<sup>2</sup> de área de reserva territorial eólica, que no interfiere con actividades agrícolas y pecuarias, correspondiente al 0,6% del territorio nacional.

Este ejercicio es una aproximación muy gruesa al potencial eólico de México, pero ilustra la gran magnitud de ese recurso, lo que se confirma con estudios realizados en otros países.

El Consejo para el Desarrollo Sustentable de la Energía en Texas, realizó una evaluación preliminar de sus recursos de energías renovables en 1995, y en el caso específico de la energía eólica, los resultados se resumen en la siguiente tabla:

### Potencial de producción eléctrica en terrenos ventosos en Texas

| Clase de potencia eólica | Área (km <sup>2</sup> ) | Porcentaje de superficie del Estado | Capacidad Potencial (MW) | Potencial de Producción (TWh) | % del consumo en Texas |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------|
| 3                        | 143 400                 | 21,13%                              | 396 000                  | 860                           | 371%                   |
| 4                        | 29 700                  | 4,38%                               | 101 600                  | 231                           | 100%                   |
| 5                        | 5 000                   | 0,74%                               | 21 600                   | 48                            | 21%                    |
| 6                        | 300                     | 0,04%                               | 1 600                    | 4                             | 2%                     |
| <b>Total</b>             | <b>178 400</b>          | <b>26,29%</b>                       | <b>524 800</b>           | <b>1 143</b>                  | <b>493%</b>            |

Fuente: Texas Renewable Energy Resource Assesment. Julio de 1995

### Densidad de Potencia en el viento según la clase

| Clase de Potencia Eólica | Densidad de potencia ( $W/m^2$ ) | Velocidad media del viento (m/s) | Viabilidad Comercial (Tarifas actuales) |
|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---|
| 3                        | 300 a 400                        | 6 a 7                            | Marginal                                |
| 4                        | 400 a 500                        | 7 a 7,5                          | Buena                                   |
| 5                        | 500 a 600                        | 7,5 a 8                          | Muy Buena                               |
| 6                        | 600 a 800                        | 8 a 8,75                         | Excelente                               |

Este cuadro limita el inventario a terrenos con ciertas características físicas y cercanos a carreteras y líneas de transmisión eléctrica, no está considerando la totalidad del territorio del Estado. La viabilidad comercial está en relación con costos de generación considerando el nivel de precios internacionales del petróleo y generación termoeléctrica que no contabiliza costos externos. Esta evaluación se realizó, y continúan los estudios a mayor detalle, utilizando la topografía digitalizada del territorio del Estado de Texas y modelos computacionales de dinámica de fluidos, lo que permite simular el flujo del viento sobre los accidentes topográficos de una gran superficie.

El ejemplo del Estado de Texas muestra que el recurso energético eólico, es mucho más extenso de lo que se puede apreciar empíricamente y del análisis de la información de los Servicios Meteorológicos Nacionales. Estas mediciones son, en general, escasas. Normalmente se realizan en las inmediaciones o el interior de asentamientos humanos importantes, los instrumentos y la metodología de proceso de datos no corresponden a los requisitos de una caracterización eoloenergética ni corresponden a los sitios más ventosos. Esta información subestima el potencial eólico. El valor de la información del Servicio Meteorológico radica en la caracterización cualitativa del viento en las diferentes regiones de un país, lo que constituye una información indispensable para extrapolar en tiempo y espacio los estudios detallados en lugares de interés, así como para los modelos de simulación.

En España, a finales del 2005, la Universidad de Comillas en Madrid, publicó el estudio de potencial de generación eléctrica para todas las fuentes renovables, estableciendo sus potenciales aprovechables, lo que denominó techos de generación, encontrando para la

eólica terrestre un potencial aprovechable de 915 mil MW y de 164 760 MW para la eólica marina, produciendo en conjunto 2 619 TWh, cuando se espera una demanda total de 280 TWh con un consumo per cápita de 7 300 kWh/hab-año para el año 2050. Esto significa que únicamente eólica podría producir 9,35 veces toda la energía eléctrica requerida. Tan sólo las energías renovables en conjunto de serían capaces de generar 56,42 veces la demanda eléctrica del 2050 en España.

Este estudio se realizó discriminando a través de Sistemas de Información Geográfica, todas las áreas no aprovechables por los diversos criterios mencionados, evaluando los terrenos idóneos con una base de datos meteorológicos, que reconocen es insuficiente. Análisis como éste demuestran con creces que las energías renovables son suficientes para satisfacer TODAS las necesidades eléctricas de un país, sin las emisiones de gases de efecto invernadero de los combustibles fósiles, ni el problema de contaminación radioactiva y disposición final de los residuos radioactivos de las centrales nucleares y las instalaciones de refinación y reproceso del combustible nuclear, por no hablar de sus implicaciones militares y terroristas, es decir, geopolíticas y de seguridad internacional.

Otro ejemplo: En Estados Unidos, el MIT, General Electric y el Departamento de Energía, publicaron conjuntamente en septiembre del 2005 un documento titulado "*A Framework for Offshore Wind Energy Development in the United States*", donde señalan que el potencial explotable mar adentro en sus aguas continentales y de sus islas es de 900 mil MW, cifra mayor que su actual capacidad instalada total de generación eléctrica.

En China, se tiene estimado un Potencial Aprovechable de 3 226 GW y un Potencial Técnico a desarrollar de 253 mil MW. El Plan actual es desarrollar 30 mil MW al 2020.

### **La descalificación a la energía eólica**

Las razones para minimizar la importancia de la energía eólica en la generación eléctrica en gran escala son dos malentendidos sobre ella, a saber:

- 1º. Que se requieren sitios con vientos fuertes y uniformes.

2º. Que por su variabilidad e intermitencia, no aportan energía firme y no son despachables.

Cualquiera que haya visitado instalaciones eólicas en Dinamarca y Alemania se sorprende de ver los aerogeneradores funcionando, cuando a nivel del suelo apenas se siente una suave brisa. Esto se debe a que a 60 m de altura la velocidad del viento es mayor que la que se percibe a nivel del suelo, y que en última instancia, la “ventana” de vientos aprovechables va de 5 a 15 m/s, y mientras ese intervalo de velocidades se presente a la altura del rotor, el aerogenerador estará produciendo electricidad.

Este gran malentendido hace suponer que únicamente sitios como La Ventosa en Oaxaca son idóneos para la explotación eólica. Lo son para una empresa extranjera que pretende vender electricidad a CFE, en un sitio con alto factor de planta y por tanto alta rentabilidad sobre la inversión, pero ese no es el criterio técnico principal para incluir centrales eólicas en un sistema eléctrico.

### **El mito de la intermitencia**

El viento es intermitente y variable cuando lo experimentamos desde un solo sitio de observación. Tan intermitente y variable como lo es la demanda eléctrica de cada usuario del servicio. El consumo eléctrico de cada usuario es aleatorio, el consumo agregado de los usuarios en una red eléctrica determina estadísticamente la denominada “curva de demanda diaria”, que varía según el día de la semana y evoluciona también con las estaciones del año (días más cortos o largos, más calor o frío, días feriados o vacaciones, etc.). El consumo de energía es variable lo mismo que la oferta eólica.

Un aerogenerador solitario experimenta la micro y la macro turbulencia del viento, generando electricidad de forma variable e intermitente. En un conjunto de aerogeneradores interconectados en un punto de la red eléctrica, se compensan mutuamente las variaciones de micro turbulencia, aportando energía con fluctuaciones horarias correspondientes a la macro turbulencia. Muchos conjuntos de aerogeneradores interconectados al sistema en una región geográfica, aportan energía filtrando incluso las variaciones por macro turbulencia,



según un patrón de oferta eléctrica que corresponde al promedio horario estadístico del viento en la región. Este patrón es conocido y existen metodologías para el pronóstico a 24 horas, como el usado actualmente por el operador de la red eléctrica de España.

Un aerogenerador solitario necesita de un sistema de almacenamiento de energía para satisfacer la demanda que es también intermitente y variable, y seguramente comportándose diferente a la oferta eólica. Pero las centrales eólicas distribuidas en un territorio e interconectadas a la misma red eléctrica, aportan energía de acuerdo a un patrón de oferta previsible, correspondiente al patrón de vientos regional. Por esta razón, la aportación de energía eléctrica a la red por fuentes renovables denominadas “intermitentes”, solo tiene sentido cuando se integran masivamente, dejando de ser intermitentes para convertirse en previsibles. En el sistema eléctrico del futuro, tendremos así dos tipos de centrales generatrices: las programables y las previsibles. En última instancia, lo importante para determinar el grado de “penetración” de aerogeneradores en una red eléctrica, es la compatibilidad entre el patrón de oferta eólica y la curva de demanda en ella. Se considera actualmente que una media de penetración, sin comprometer la estabilidad y el despacho, está entre el 20 y el 25%.

El Potencial Técnico se refiere básicamente al nivel de penetración que pueden tener las centrales eoloeléctricas dentro del sistema eléctrico de una región. Es la capacidad de transmisión de las redes eléctricas en media y alta tensión, y los niveles de consumo regionales lo que determina la capacidad instalable en MW de centrales eoloeléctricas. Para el caso de Texas, el potencial bruto era del orden de 20 veces el potencial técnico instalable. Los desarrollos eoloeléctricos en otros países han mostrado un panorama semejante, por lo que ya nadie se preocupa por establecer “El Potencial Eólico Nacional”. El viento existe y sobra.

El problema se enfoca a identificar los sitios de posible explotación que conjuguen la mayor cantidad de criterios de viabilidad por cuanto a beneficios, costos, impactos ambientales y sociales, etcétera, y realizar con ellos un inventario de sitios de posible explotación cuyo desarrollo se organice conjuntamente con la entidad reguladora del Sistema Eléctrico. En México serían CFE y la CRE quienes coordinarían a nivel Federal, y los Estados a nivel local, el desarrollo de la energía eólica para generación eléctrica en gran escala.

La Secretaría de Energía a través de los últimos 30 años jamás se preocupó por establecer, aunque fuera preliminarmente, el potencial técnico de las energías renovables en México, y CFE como todas las empresas eléctricas en el mundo, se ha resistido a integrar la tecnología eólica a la oferta eléctrica nacional. Siempre han aducido dos razones: que era cara y que no es despachable, es decir, que su nivel de generación eléctrica no depende del operador de la central. Estos argumentos eran válidos hace 20 años, cuando se hacían las primeras instalaciones y se estudiaba aún su interacción con la red eléctrica. Ahora es una necesidad insistir en ello. El costo de generación entre una Central de Ciclo Combinado a gas natural y una eoloeléctrica se igualaba con un precio del gas natural de 4 dólares por millón de BTUs. El precio del gas natural en México para noviembre de 2004, era según la CRE de 7,27 dólares por millón de BTUs, y las dificultades regionales (México, Estados Unidos y Canadá) para un suministro creciente y confiable se complicaban cada día, haciendo improbable un precio bajo en el corto y mediano plazo. En diciembre del 2005 el gas llegó a costar 15 dólares el millón de BTUs, aunque a mediados del 2006 el precio se ha mantenido alrededor de los 6 dólares, implicando un costo de generación en centrales de ciclo combinado del orden de los 7 centavos de US Cy por kWh generado, 50% más caro que el kWh eólico. De hecho, durante el presente año, 2006, se está subsidiando el precio del gas. En términos de poder calorífico, el millón de BTUs en que se cotiza el gas natural, correspondería a 1/6 del precio del barril de petróleo, el que rondando los 70 dólares, implicaría un precio de 11,66 US Cy/millón de BTUs de gas natural, cuando en el mercado spot del Henry Hub se cotiza en 6,5 US Cy. Si el precio del gas natural correspondiese al equivalente energético del petróleo, se colapsaría la industria eléctrica de los ciclos combinados.

Por cuanto a la despachabilidad, el error está en considerar que una central eoloeléctrica operaría en el Sistema Eléctrico como si fuera central convencional. La generación eoloeléctrica se integra al sistema como Generación Distribuida, es decir, como pequeñas centrales interconectadas a los circuitos primarios de distribución, no formando parte de los nodos de la red de Alta Tensión. La generación distribuida se comporta eléctricamente como Cargas Negativas, es decir, como centros de carga que en lugar de consumir aportan energía al sistema, y de la misma manera que las cargas positivas determinan estadísticamente a lo largo del día un patrón de consumo o demanda eléctrica, al cual se sujeta el despacho de carga, el patrón de oferta eléctrica por la generación eólica distribuida,

de acuerdo con el patrón diario estadístico de la velocidad del viento en la región, se resta al patrón de demanda, resultando en una curva de Demanda Residual sobre la cual debe programarse ahora el despacho de carga.

El que un aerogenerador o una pequeña central eoloeléctrica no tenga aportación de Capacidad Firme al Sistema, no tiene la menor importancia, lo que importa es el efecto agregado de muchos aerogeneradores interconectados de manera distribuida en una región, compensándose mutuamente las fluctuaciones de potencia en cada sitio de explotación, y aportando en conjunto según un patrón de oferta que corresponde al patrón estadístico de vientos en la región. Es la compatibilidad entre el Patrón de Demanda y el Patrón de Oferta Eólico lo que determina el Nivel de Penetración de la generación eólica en un sistema. Hace 20 años se hablaba prudentemente de un 10%, hoy se tienen experiencias cercanas al 35% y tratándose de grandes sistemas interconectados, algunas regiones tienen autosuficiencia eléctrica con energía eólica. La provincia de Navarra en España espera pronto autoabastecer con energía eólica el 80% de su consumo eléctrico. En México, el estado de Aguascalientes podría en el corto plazo ser 100% autosuficiente eléctricamente con sólo 600 MW de capacidad eoloeléctrica.

Para el año 2050 en que la población nacional se estabilizase en el orden de los 130 millones de habitantes, el potencial técnico explotable de energía eólica para generación eléctrica interconectada a la red sería del orden de 50 mil MW. La capacidad instalada para producir hidrógeno como vector energético secundario, podría ser de ese mismo orden de magnitud. No hay problema, el Potencial Aprovechable en México seguramente supera el millón de MW.

La mejor manera de minimizar los supuestos defectos de la energía eólica es precisamente maximizando su penetración en el sistema eléctrico de forma distribuida. En el norte del país, los vientos energéticos ocurren alrededor del invierno, en tanto que en la parte central en el verano. En el Istmo de Tehuantepec los vientos fuertes son también alrededor del invierno, en tanto que la península de Yucatán está expuesta todo el año a los vientos alisios, y la Península de Baja California a los vientos occidentales. Nuestros 10 mil kilómetros de litoral son un enorme motor de brisa marina, donde la combinación mar y viento es propicia para la producción de hidrógeno.

## 5.2 La transición energética en el sector eléctrico

El desafío actual de CFE es cambiar sin dejar de ser ella misma, no se trata de cambiar para que todo siga igual, sino de mantener la esencia de un proyecto nacional, de servicio a México, como un sector estratégico que es palanca vital de su desarrollo económico y que puede serlo también de un aspecto de su desarrollo tecnológico. El proyecto nacionalista que dio origen a la CFE sigue siendo nuestro referente para impulsar las transformaciones necesarias. ¿Cuáles son éstas? Analicemos la evolución reciente de los sistemas eléctricos en los países avanzados.

A raíz del embargo petrolero de 1973, Europa, Japón y los Estados Unidos, entendieron la vulnerabilidad estratégica de depender principalmente de energéticos importados. Se reaccionó con dos grandes vertientes al interior; la racionalización energética, eliminando derroches e ineficiencias, de ahí surgieron importantes programas de mejoramiento tecnológico y consecuente ahorro de energía. La segunda vertiente tuvo que ver con el desarrollo de energéticos nacionales, donde los recursos renovables locales, tuvieron primordial importancia. Hacia el frente externo, la estrategia de los 7 grandes fue impulsar el desarrollo de exportadores de petróleo al margen de la OPEP, lo cual quebró el monopolio del precio que intentaron establecer, y finalmente ocasionó la caída de precios internacionales del petróleo, lo que hizo disminuir el interés por las energías renovables. Sin embargo, es el deterioro ambiental y hasta los últimos meses, el precio de los hidrocarburos, lo que está determinando un regreso importante a las energías renovables.

Lo que a través de programas públicos en los países desarrollados se avanzó en los años 70, al definir estrategias, y durante los 80 al desarrollar aplicaciones masivas, ha sentado las bases de lo que ahora se está realizando, cuya faceta más importante es en relación con la energía eólica. En 1974 el presidente Richard Nixon lanza el proyecto "Independencia", enfocado a racionalizar el consumo y desarrollar energéticos nacionales. El presidente Carter le da cuerpo y lo arranca. Para el caso de la energía eólica hay dos preguntas básicas a responder: ¿Tenemos el recurso en el territorio de los Estados Unidos?, y de haberlo, ¿Cuáles son las aplicaciones más importantes y sus mercados potenciales? Al laboratorio

Nacional del Noroeste se le encomienda hacer el Atlas Eólico Preliminar de los EUA, basada en la información meteorológica de más de mil observatorios, con información de muchas décadas de su Servicio Meteorológico Nacional. A una empresa importante de la aviación se le contrata para realizar el "Análisis de Misión" de la energía eólica en dicho país. Este estudio muestra que la generación eléctrica en gran escala, integrada a las empresas prestadoras del servicio de energía eléctrica, constituye el mercado más importante seguido por aerogeneradores de unos 50 kW para aplicaciones en las dos millones de granjas agropecuarias existentes en los Estados Unidos.

Paralelamente a las actividades técnicas, se modificó la legislación eléctrica para permitir e incentivar la pequeña producción independiente de energía eléctrica a partir de fuentes renovables y cogeneración. En 1978 se promulga la "*Public Utility Regulatory Policy Act*" mejor conocida por sus siglas: PURPA, con la cual se hace obligatorio a las empresas prestadores del servicio público de electricidad, el adquirir la energía eléctrica de productores independientes, para su distribución y venta a los usuarios finales. Estas acciones se complementaron con incentivos fiscales, subsidios y financiamiento blando, lo que da origen a crear las condiciones para que una tecnología emergente, como la conversión eolieléctrica, pueda desarrollar su mercado.

En Europa y Japón, se siguió un camino semejante, de apoyo al desarrollo tecnológico, como crear las bases jurídicas y financieras para una nueva estructura del mercado eléctrico, en que el monopolio de la generación eléctrica se rompe, para permitir el aprovechamiento masivo de energías renovables como de sistemas de cogeneración en la industria. Dinamarca es un caso extraordinario de congruencia y colaboración entre el sector público y el privado, para el desarrollo del mercado de la generación eléctrica con energía eólica. Este país llegó al año 2000 con 1000 MW de capacidad eolieléctrica, donde al menos tres cuartas partes de ella, pertenece a cooperativas rurales, que instalan aerogeneradores para su consumo y el excedente es vendido a una de las dos empresas eléctricas que prestan el servicio en dicho país.

Después de muchos altibajos, fracasos y proyectos fallidos, tanto en los Estados Unidos como en el resto de los países desarrollados, desde 1997 las Centrales Eolieléctricas se expanden por el mundo con una tasa de crecimiento anual de 25%, completando para el

2000 una capacidad instalada total del orden de los 15 mil MW, y alcanzando los 60 mil MW al inicio del año 2006, para en varios años más desarrollar una capacidad instalada semejante a la hidroeléctrica, que por cuanto a grandes proyectos está cercana ya a su saturación. La próxima década señalará el desarrollo emergente de la energía solar para la generación eléctrica fotovoltaica en generación distribuida, y termosolar, donde la disponibilidad de agua para el enfriamiento lo permita.

Los tres paradigmas básicos de los sistemas eléctricos durante el primer tercio del siglo XXI, son **energías renovables, generación distribuida y administración de la demanda**. La falta de despachabilidad de las fuentes de energía intermitentes, la solar y la eólica, será compensada con la masividad dispersa y la administración de la demanda, en conjunción con el despacho de carga de las centrales basadas en energía almacenada, como presas e hidrocarburos y carbohidratos (por ejemplo, cogeneración con bagazo de caña en la industria azucarera).

### **5.3 Centrales eoloeléctricas en México**

El país cuenta con el potencial eólico suficiente para que cuando el Sistema Eléctrico Nacional se encuentre en el orden de los 170 mil MW a mediados del siglo, 50 mil MW sean eoloeléctricos, mayor que la capacidad hidroeléctrica total instalada para esas fechas. Para entonces cada techo será también una pequeñita central eléctrica fotovoltaica, cada fábrica con procesos térmicos tendrá una cogeneradora, cada unidad agropecuaria un productor excedentario de energía, solo así, distribuyendo la generación de electricidad a lo largo y ancho del país, haciendo partícipe a la sociedad entera del suministro energético, se habrá de resolver el problema sin deteriorar el medio ambiente ni depredar recursos, como lo hacen nuestras centrales termoeléctricas, que proveen el 65% de la generación eléctrica actual.

El Sector Eléctrico en México sigue teniendo una gran resistencia a la apertura a los pequeños productores independientes, a la cogeneración con excedentes y al autoabastecimiento municipal, que implica hacer uso de toda la infraestructura de distribución, primaria y secundaria, urbana y rural, para el suministro eléctrico en los usos finales, alumbrado y bombeo de aguas potables y negras. Esta resistencia es semejante a la

que todas las empresas eléctricas en el mundo han tenido, cuando empiezan a dejar de ser el monopolio del servicio, y enfrentan una situación completamente nueva de pasar de un sistema radial, con grandes centros de producción eléctrica, a un sistema en red donde los usuarios son ahora también generadores de electricidad, y en un momento dado sea él quien cobre a la empresa eléctrica la energía suministrada.

Las centrales eoloeléctricas construidas operarán bajo el régimen de autoabastecimiento, pequeña producción y producción independiente. La energía comprada por CFE sería con precio mínimo garantizado, de acuerdo a las Regulaciones para Energías Renovables, sujetas a Régimen Especial, teniendo como modelo de referencia las legislaciones Alemana y Española respecto de renovables, que han mostrado ser sumamente exitosas.

Las empresas desarrolladoras se encargarán de obtener el financiamiento para las centrales, en base a un proyecto viable técnicamente y la recuperación económica garantizada por contratos de compra de largo plazo.

**Distribución posible de capacidad instalada eoloeléctrica  
en México al año 2017**

| REGIÓN              | Capacidad instalada (MW) | OBSERVACIONES   |
|---------------------|--------------------------|---|
| Baja California     | 1000                     | Demanda de región fronteriza  |
| Baja California Sur | 500                      | Integración eléctrica   |
| Costa de Sonora     | 500                      | Sonora y Sinaloa  |
| Costa Pacífico Sur  | 500                      | Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán y Guerrero                        |
| Tehuantepec         | 500                      | Podría crecer sólo con grandes demandas locales                       |
| Costa del Caribe    | 500                      | Quintana Roo y Cozumel  |
| Golfo               | 500                      | Veracruz y Tamaulipas   |
| Centro Sur          | 1000                     | Puebla y Tlaxcala, Hidalgo, Morelos y el DF                           |
| Centro Norte        | 4000                     | Desde Querétaro hasta Zacatecas, incluyendo Durango y San Luis Potosí |
| Norte               | 1000                     | Chihuahua, Coahuila y Nuevo León                                      |
| <b>TOTAL</b>        | <b>10 000 MW</b>         | <b>SÓLO CENTRALES EOLOELÉCTRICAS</b>                                  |

La participación privada en el Sector Eléctrico tiene fundamentalmente esta connotación, la participación de los sectores público, social y privado en la generación eléctrica distribuida, conservando las empresas suministradoras el control de las grandes centrales y del sistema nacional interconectado, pudiendo concesionar en algunos casos la distribución eléctrica a empresas municipales, para que así se puedan coordinar trabajos con la red de distribución de agua potable, alcantarillado, gas natural, líneas telefónicas, fibras ópticas y vialidad,



siendo esta coordinación un elemento importante de la regulación del crecimiento de los asentamientos urbanos, al extender la red de servicios según los planos reguladores.

Esta transformación del Sector Eléctrico es el gran reto. La pequeña generación independiente estará encabezada por centrales eoloeléctricas, seguida de pequeñas centrales hidroeléctricas. Las municipalidades con empresas tecnológicas constituirán importantes promotores del autoabastecimiento eléctrico, aprovechando recursos energéticos locales, que siendo insignificantes para el Sistema Eléctrico, sí cubren las necesidades de los servicios públicos de una municipalidad. También industrias locales o empresas de servicios podrán aprovechar recursos energéticos locales para satisfacer sus necesidades, transfiriendo excedentes, cuando existan y con el respaldo del Sistema Eléctrico.

El aprovechamiento masivo de recursos energéticos renovables bajo esquemas nuevos de participación social en su explotación y usufructo, es un pilar de un desarrollo sustentable, donde la energía eólica lleva la delantera por madurez tecnológica y económica, y por tanto constituirá una alternativa importante de generación eléctrica y de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero asociada a la generación termoeléctrica.

La generación eoloeléctrica no sólo constituye una forma limpia de generación eléctrica, sino también la que provee más empleos locales y regionales. La generación eléctrica con energía eólica paga empleos, no combustibles. Esta forma de generación eléctrica no sólo es ambientalmente amigable sino que también lo es socialmente, al constituirse en un motor de desarrollo local y regional.

### **Enfoque a las energías renovables en los sistemas eléctricos**

Durante los próximos 10 años los combustibles fósiles tendrán aún una participación significativa en la generación eléctrica, iniciándose su declinación durante la segunda década del siglo, pasando a ser marginales al completarse la tercera década. Cualquier política energética de largo plazo debe reconocer que estamos inmersos en un proceso de transición, por lo que dicha planeación debe estar diseñada para facilitar esa transición. Sólo

con una visión de largo plazo es posible tomar las acciones que siembren ese germen de futuro deseable, un sistema energético sustentable, donde no haya contaminación acumulativa y se tengan fuentes de energía inextinguibles. Ese futuro pertenece a las energías renovables y al hidrógeno como vector energético.

En razón de lo anterior, en los países desarrollados se han establecido diversas políticas públicas de incentivación y fomento a las energías renovables para inducir la conformación de sus mercados respectivos y superar la coyuntura de corto plazo, en que al no considerarse las externalidades, el valor comercial actual de los energéticos no refleja su valor en el contexto de un sistema sustentable. Considerando que estamos en un proceso de transición energética, las inercias socioeconómicas sólo pueden ser vencidas, cuando el Estado, con una visión estratégica de largo plazo, cree las condiciones de mercado que hagan posible el corrimiento a un nuevo modelo. Dentro de la actual coyuntura internacional de liberalización de los mercados eléctricos, existen dos modelos básicos de fomento al uso de renovables para la generación eléctrica incorporada a los sistemas eléctricos nacionales: el modelo “competitivo” y el mandatorio con precio garantizado.

### **Participación “competitiva”**

En un mercado eléctrico liberalizado, competitivo, este modelo se impone por ley, como la obligación de que los distribuidores utilicen al menos una fracción determinada de su suministro eléctrico a partir de energías renovables, ya que de otra manera no ocurriría nada. Este es el caso de la “*Non Fossil Fuel Obligation*” en el Reino Unido, en la que se establecieron cuotas de participación de energías renovables, que se sometían anualmente a licitación, adjudicándose a los proyectos más rentables. Este sistema pone en competencia entre sí a las mismas tecnologías, esto es, pongamos por ejemplo dos proyectos eólicos para diferentes sitios. Aquel con las mejores condiciones de viento a lo largo del año será el ganador. Si el proyecto perdedor compite al siguiente año contra otro proyecto en otro sitio que le supera, vuelve a perder, por lo que difícilmente seguirá compitiendo. Este modelo, presenta las siguientes desventajas a la luz de la experiencia reciente:

a) No tiene acceso legalmente garantizado para todas las centrales de FRE

- b) Cualquier cuota, -aún las llamadas “mínimas”- llevan a límites administrativos, reduciendo sus posibles tasas de crecimiento y bloqueando su desarrollo
- c) Las FRE Pueden ser competitivas frente a otras siempre y cuando se introduzcan “Bandas Tecnológicas”, lo que incrementa la burocracia
- d) Crea un limitado desarrollo de mercado debido al pequeño número de inversionistas, no deja espacio para desarrollar una industria nacional
- e) Este enfoque requiere de largos, costosos y burocráticos procesos de implementación, con alto riesgo económico, que excluye automáticamente a cooperativas e inversionistas locales
- f) Crea problemas masivos de aceptación pública, porque tiende a concentrar los proyectos en las mejores áreas, sin involucramiento local.

En resumen, el sistema de cuotas tiende a disminuir la penetración del mercado, da pocos beneficios ambientales, ocasiona menor competencia debido a los efectos de concentración de proyectos entre fabricantes y operadores, y da lugar a problemas de aceptación pública. Su resultado final puede significar que sea mucho más cara para la sociedad esta energía eléctrica, como resultado de una mayor administración burocrática y de los procedimientos de control y supervisión que implica.

Por las razones anteriores, el Reino Unido dio por terminado este modelo de fomento a las renovables en el año 2004.

### **Obligación de comprar a largo plazo con precio mínimo garantizado**

El otro modelo, exitosamente aplicado en Alemania, España, Dinamarca, Portugal, Grecia, Bélgica, Italia y Luxemburgo, consiste en la obligación de las empresas distribuidoras de comprar con precio garantizado la energía eléctrica proveniente de energías renovables, con base en disposiciones técnico económicas establecidas por ley. Este modelo es el que verdaderamente está creando las condiciones de mercado para el florecimiento de las energías renovables en un mercado realmente competitivo, cuando las externalidades estén integradas a su valor comercial. Esto está ocurriendo, ya que al favorecer sin limitaciones artificiales la expansión de estas tecnologías, permite grandes inversiones en instalaciones

de fabricación de éstas, abatiendo costos por producción masiva y situándolos en mayor ventaja competitiva, lo cual se logra con un sistema que es mucho más fácil de administrar.

### Diagnóstico de penetración en el mercado europeo según los modelos

El caso de centrales eoloeléctricas en Europa, por ser la tecnología emergente más avanzada, más económica y que es puntera en la penetración masiva del Sector Eléctrico, ilustra claramente la efectividad de los modelos de fomento señalados. En Europa, varios países han ensayado diversas modalidades de fomento a la generación eléctrica con renovables, con diferentes niveles de éxito, pero que en general se restringen a los modelos señalados y que en el caso de la energía eólica, el cuadro siguiente muestra los resultados obtenidos, lo cual es indicativo de la importancia de un marco legal apropiado para una efectiva promoción a las energías renovables.

#### Comparación de modelos de fomento en Europa Instalaciones Eoloeléctricas en MW

| Tipo            | PAÍSES             | Capacidad agregada anualmente en MW |      |      |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|--------------------|-------------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 |                    | 1996                                | 1997 | 1998 | 1999  | 2000  | 2001  | 2002  | 2003  | 2004  |
| Libre<br>(a)    | <b>Alemania</b>    | 409                                 | 537  | 793  | 1'569 | 1'668 | 2'640 | 3'248 | 2'608 | 2'020 |
|                 | <b>España</b>      | 104                                 | 263  | 368  | 644   | 790   | 835   | 1'493 | 1'372 | 2'061 |
|                 | <b>Dinamarca</b>   | 183                                 | 259  | 310  | 289   | 555   | 116   | 472   | 221   | 7     |
| Dirigido<br>(b) | <b>Reino Unido</b> | 70                                  | 50   | 10   | 18    | 53    | 76    | 67    | 97    | 239   |
|                 | <b>Irlanda</b>     | 4                                   | 40   | 12   | 10    | 45    | 7     | 12    | 49    | 153   |
|                 | <b>Irlanda</b>     | 3                                   | 0    | 10   | 4     | 56    | 6     | 60    | 94    | 147   |

(a) Modelo de precio garantizado, contrato de largo plazo y acceso libre al sistema

(b) Modelo de cuotas obligatorias y licitaciones competitivas

### Instalaciones y capacidad acumulada al 31/12/05

| Tipo            | PAÍSES      | Instalado 2005 | Acumulado total |
|-----------------|-------------|----------------|-----------------|
|                 |             | MW             | MW              |
| Libre<br>(a)    | Alemania    | 1 799          | 18 428          |
|                 | España      | 1 764          | 10 028          |
|                 | Dinamarca   | 4              | 3 128           |
| Dirigido<br>(b) | Reino Unido | 465            | 1 353           |
|                 | Irlanda     | 157            | 497             |
|                 | Francia     | 371            | 757             |

Dinamarca redujo sus instalaciones ya que prácticamente ha saturado su potencial aprovechable en tierra, siendo la pionera en centrales eoloeléctricas marinas. Este país de 8 millones de habitantes y un territorio semejante al estado de Yucatán (extensión y topografía), tiene el mayor índice de Watts/habitante de capacidad eólica y su contribución es del orden del 25% de la electricidad generada. El despegue de Francia, Irlanda y el Reino Unido, a partir del 2004, es por la transición a un modelo de precio garantizado. En junio del 2006, Irlanda estableció un nuevo marco, denominado *Renewable Energy Feed-In Tariff* (REFIT), que por ahora tiene un cupo de 400 MW, lo que ha desatado una carrera para llegar a firmar los contratos, que dependen de conseguir tanto la autorización administrativa como el visto bueno sobre el punto de conexión a la red. El marco de retribución que acaba de entrar en vigor pretende ayudar a que el país cumpla con sus objetivos de energías renovables para el 2010, fijado en una aportación al sistema eléctrico de 13,2%, lo que equivale a unos 1 450 MW.

Los modelos de precio mínimo garantizado no sólo han sido diez veces más efectivos en términos de tasa de instalación, también han sido más eficientes para sus economías nacionales, debido a que han permitido el desarrollo de fuertes industrias manufactureras locales. Los fabricantes locales de aerogeneradores, alemanes, daneses y españoles surten el 90% del mercado mundial. En muy pocos años han creado más de 30 mil empleos. En Alemania, el aumento en la producción significó que al duplicarla, los precios exfábrica de

sus sistemas se redujo 14%. Siendo España quien entró al juego después de Dinamarca y Alemania, ahora, de los diez principales fabricantes de aerogeneradores en el mundo, cuatro son españolas, aunque habría que precisar ahora que son tres, ya que *MADE* fue adquirida por *Gamesa Eólica*.

El aprendizaje sobre el desarrollo de la eólica en Europa, y principalmente en España, nos señala el tipo de medidas de política pública, que son necesarias para desarrollar, no sólo la capacidad instalada de generación eoloeléctrica, sino también la capacidad de prospección, fabricación, instalación y operación de la infraestructura eoloeléctrica, con implicaciones directas de creación de empleos y desarrollo regional.

*El desarrollo sustentable del sector energético, y del eléctrico en particular, sólo puede efectuarse a través de una reestructuración total en que los paradigmas cambien. El desarrollo sustentable es un problema cultural, por tanto político y social, que implica una nueva visión tecnológica, una actitud social diferente, más vigilante y comprometida con una causa que es de todos: detener el deterioro ambiental y social que el actual modelo de desarrollo implica.*

#### **5.4 Propuesta de Plan Nacional de Emergencia para el Desarrollo de la Energía Eólica**

A raíz de la crisis eléctrica en California en el año 2000, a causa del incremento brutal en el precio del gas natural, y considerando el enfoque nacional al crecimiento de la capacidad de generación eléctrica básicamente con ciclos combinados a gas natural, presenté al Secretario de Energía, Ing. Ernesto Martens, a principios del 2001 la propuesta de un Plan Nacional de Emergencia Eólico, cuya introducción y justificación transcribo a continuación:

##### **Introducción**

México cuenta con una capacidad instalada de generación eléctrica del orden de 40 mil MW, considerando las instalaciones privadas y de PEMEX, lo que deriva en un consumo per

cápita de 2000 kWh/hab-año, capacidad que debe crecer al 6% anual para soportar el desarrollo del país. Un escenario del sistema eléctrico al año 2030, en que fuésemos 125 millones de mexicanos, requeriría al menos 125 mil MW instalados, considerando 1 kW per cápita ó 4000 kWh/hab-año, lo que significa una capacidad adicional del orden de 100 mil MW durante los próximos treinta años, considerando las centrales de generación que deberán darse de baja por su antigüedad.

Las cuestiones que surgen al respecto son: ¿Con qué energéticos primarios?, ¿Con qué tecnologías de conversión a electricidad?, y ¿Con qué estructuras socio técnicas se desarrollará, administrará y controlará ese nuevo sistema eléctrico?

Los cambios tecnológicos hacia nuevas formas de generación eléctrica, como microgeneración distribuida y el uso masivo de energías renovables, la tendencia a la descentralización política y social y las restricciones al uso de combustibles fósiles por sus impactos ambientales, ya que las consecuencias del cambio climático se están mostrando catastróficas, marcarán una profunda transformación del Sector Eléctrico. Será desde esa visión como debemos replantear el camino a seguir para poder estructurar un sistema eléctrico sustentable.

Por ahora, el plan de expansión eléctrica está sustentado básicamente en centrales de ciclo combinado a gas natural, pretendiéndose una capacidad adicional de 23 mil MW al año 2009, en el momento en que los precios se han disparado al alza, México se ha convertido en importador neto de gas natural, e indudablemente se carece de garantías por cuanto a precio y seguridad de suministro en los próximos 30 años. El precio prevaleciente a principios del 2000, de \$2,00 US por millón de BTU, difícilmente podrá repetirse, cuando por su demanda y escasez relativa alcanzó los \$10,10 US en diciembre del 2000 en el mercado "spot", y sus precios a futuros lo ubican en el intervalo de los \$6 US, muy por debajo aún de los precios a los usuarios finales, que han alcanzado los \$60,00 por millón de BTU. Con estos precios del gas natural, la generación eléctrica con ciclos combinados, se oferta en contratos de largo plazo por arriba de los \$0,08 US, precio contra el cual la generación eoloeléctrica es competitiva.

Por otro lado, México cuenta con extraordinarios recursos energéticos renovables, de los cuales el viento constituye por ahora la opción inmediata, por madurez tecnológica, costos competitivos y la oportunidad de desarrollo industrial y tecnológico que ofrece. Con base en esto, se propone la implantación inmediata de un Plan Nacional de Emergencia para la inclusión de 10 mil MW eolieléctricos al año 2010 en el Sistema Eléctrico Nacional.

## **Objetivo**

Fabricar en México, e instalar en conjuntos, aerogeneradores en el rango de 500 a 750 kW de potencia nominal, preferentemente, para alcanzar los 10 mil MW instalados al año 2010, y completar al menos 30 mil MW al 2030.

## **Justificación del Plan**

a) No se requerirá consumir ningún combustible cuyo suministro y precio sea incierto, el abasto de gas natural a la termoeléctrica Benito Juárez en Baja California fue suspendido el 30 de enero del 2001 por la empresa estadounidense *Sempra Energy*. México es deficitario en la producción de gas natural, por lo que el objetivo inmediato es desplazar el consumo del mismo para la generación de 26,28 TWh en el 2010.

b) No se consumirá agua en sistemas de enfriamiento, lo que significaría un ahorro de 40 millones de m<sup>3</sup> en el año 2010, con un acumulado del orden de 160 millones de m<sup>3</sup> de agua dulce para esa fecha.

c) No se contribuye con emisiones de gases de efecto invernadero, evitándose emisiones por 11,24 millones de toneladas métricas de CO<sub>2</sub> para el año 2010, y acumuladas por el orden de 46 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, hasta ese año.

d) Crear hasta ese año 110 000 empleos permanentes, directos e indirectos, calificados y bien remunerados, de obreros calificados para la construcción y ensamble de los componentes electromecánicos y electrónicos, así como en las obras civiles y el montaje de



los sistemas en centrales eoloeléctricas. Otra parte corresponderá a los trabajos de prospección, exploración, localización y caracterización de sitios para emplazamientos de centrales, así como de su diseño, construcción, operación y mantenimiento.

e) Desarrollar económica y socialmente las regiones donde se masifique el uso de aerogeneradores, por la instalación de 5 grandes ensambladoras regionales, que producirían cada una 500 MW por año, más los trabajos continuos de montaje y operación y mantenimiento de la capacidad instalada, cuyo personal se reclutará de entre de los habitantes de la región.

f) Alcanzar una capacidad instalada eoloeléctrica de 30 mil MW al año 2030, que implicaría una generación anual de 79 TWh, equivalente al 18% de los 438 TWh requeridos ese año, lo que marcaría el nivel posible de penetración de la energía eoloeléctrica en la oferta nacional de energía eléctrica.

g) Existe a nivel internacional la tecnología y la disponibilidad de realizar alianzas estratégicas con fabricantes nacionales para integrar en México los aerogeneradores, así como existen fuentes de financiamiento y mecanismos para apoyar complementariamente las inversiones para el desarrollo energético sustentable.

h) Constituye una única e invaluable oportunidad de desarrollo de la ingeniería y tecnologías electromecánicas en México, quien será el trampolín para los futuros desarrollos eoloeléctricos en Centroamérica y el Caribe.”

El Secretario me contestó amablemente solicitándome más información. Me entrevisté inclusive con el jefe de la Oficina de Promoción de Inversiones. El problema recurrente en la Secretaría de Energía desde hace muchos sexenios han sido los cambios de titular y sus equipos de trabajo, y en este sexenio, como en los anteriores, ya van cuatro.

El desarrollo del potencial de generación eléctrica en gran escala en México, no es un problema tecnológico, ni financiero, ni industrial ni de recursos humanos. Es fundamentalmente un problema político. Por un lado existe un vacío jurídico respecto de las energías renovables en general, y eólica en particular. Se carece del marco regulatorio para

la explotación de las energías renovables y su integración al sistema eléctrico nacional. Por el otro lado, prevalece un fundamentalismo en la concepción del desarrollo del sistema eléctrico alrededor del gas natural y centrales de ciclo combinado, que raya en la necedad, cuando en el ámbito internacional se está dando una profunda transformación tecnológica en el sector eléctrico. Quienes como técnicos e investigadores vemos el problema, tenemos conciencia de sus varios aspectos y dificultades, en tanto que el fracaso en la mentada Reforma Eléctrica nos muestra que ni siquiera se ha podido establecer un diálogo racional e informado entre el poder Ejecutivo y el Legislativo.

¿La energía eólica será otra oportunidad perdida?

## BIBLIOGRAFÍA

Saldaña R., Caldera E., Reyes O. *Atlas Eólico Preliminar de la República Mexicana. Memorias X Reunión Nacional de Energía Solar Guanajuato*, México 1986.

Caldera E., Saldaña R. *Evaluación preliminar del potencial de generación eléctrica en la zona de La Ventosa Oaxaca*. Informe FE/01/14/2063/I-01/P Instituto de Investigaciones Eléctricas, Abril 1986.

E. Caldera et al. *Estimación Preliminar del Mercado de Aerogeneradores Integrados al Sistema Eléctrico Nacional*. Informe IIE/10/14/2067/I09/F, IIE, 1987.

E. Caldera M. *Inventarios Nacionales de Recursos Energéticos No Convencionales. 1a. Convención Nacional de Usuarios y Productores de Información Geográfica*. INEGI. 1989.

E. Caldera M. *El papel de las fuentes no convencionales de energía en la reestructuración de la Industria Eléctrica*. Informe IIE/10/14/2613/06/P. IIE, Noviembre 1989.

E. Caldera. *Estado actual y perspectivas del aprovechamiento de la Energía Eólica en México*. Informe IIE/10/14/2613/I05/P, IIE, 1990.

E. Caldera M. *La generación eléctrica en México en el Siglo XXI*. Informe IIE/10/14/2613/10/P Noviembre 1990.

E. Caldera. Parte III, Energía Eólica. "Perspectivas de las fuentes no convencionales de energía dentro del Sector Eléctrico y su posible contribución a la generación eléctrica en diferentes regiones del país" Informe IIE/10/14/2928/01/F, IIE, 1991.

E. Caldera M. *La generación de electricidad con energía eólica en México*. Boletín IIE, Vol. 18, No. 4. Julio/Agosto 1994.

E. Caldera. M. *Generación Eoloeléctrica integrada al Sistema Nacional Interconectado*. IV Congreso Latinoamericano de Turbomaquinaria. Veracruz Ver. Noviembre de 1994. Publicado también en la Revista Solar. ANES. # 31, Primavera 1995.

E. Caldera M. *La pequeña producción independiente de energía eléctrica*. Boletín IIE; Vol. 19, No. 3, pág. 107-110. Mayo-Junio 1995.

E. Caldera M. *Potencial de Generación Eléctrica en Gran Escala con Energía Eólica en México, Primer Seminario sobre situación y perspectiva del sector eléctrico en México*. Tomo 3, IIE/PUE UNAM, 1997.

E. Caldera. *Energías Renovables en México. Potenciales, Aplicaciones y Mercados*. COFER. Documento interno para la SENER 1998.

E. Caldera. *Potencial de Generación Eléctrica con Energías Renovables en México*. COFER Septiembre 1998.

E. Caldera *Autoabastecimiento Eléctrico con Energías Renovables en Sistemas Interconectados*. COFER. Julio de 1998.

E. Caldera *Conclusiones y Recomendaciones del COFER para la Inserción de las Energías Renovables en la Oferta de Electricidad en México*. COFER. Borrador en revisión. Nov. 1999.

## **Enrique Caldera Muñoz**

\*Jefe de Proyectos y Coordinador del Área de Energía Eólica (1977 a 1995)

Departamento de Fuentes no Convencionales de Energía

Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Jefe de los Programas para América Latina y el Caribe de Energía Eólica y Solar (1982-1984).

Organización Latinoamericana de Energía, OLADE. Quito, República del Ecuador.

Fundador, Secretario del I Consejo Directivo, y Presidente del VIII Consejo Directivo, (1994-1996). Asociación Nacional de Energía Solar, ANES.

Investigador Nacional Nivel I (1986-1995). Sistema Nacional de Investigadores, SNI

Asesor en Energías Renovables (1996- 1998). Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, CONAE.