

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA**  
**FACULTAD DE ARQUITECTURA**  
**UNAM**



**ENERGIA EÓLICA**  
La solución en el viento



**JAVIER POSADAS FIGUEROA**  
2007



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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



**PROGRAMA DE MAestrÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA**



**ENERGIA EÓLICA**  
La solución en el viento

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN ARQUITECTURA  
PRESENTA:

**JAVIER POSADAS FIGUEROA**



2007

---

**MENCION DEL JURADO**

**JURADO**

DIERCTOR DE TESIS:

Dr. Álvaro Sánchez González

SINODALES:

M. en Arq. Francisco Reyna Gómez  
M. en Arq. Jorge Rangel Dávalos  
M. en Arq. Ernesto Ocampo Ruiz  
Dr. Ana Dolores Flores Sandoval

---

## AGRADECIMIENTOS

### A mi familia:

**Padre:**

Tu fuerza y carácter para enfrentar la vida han forjado los cimientos de lo que ahora soy, gracias por enseñarme a ser fuerte y a vivir.

**Madre:**

Apoyo fundamental desde tiempos tempranos de mi vida, incondicional de siempre, gracias por enseñarme el significado del amor.

**Graciela:**

Gran mujer, siempre valiente, por ser así, el apoyo fundamental, te lo agradezco por lo que resta de vida, te quiero

**Raúl:**

Que seas tu el hermano mayor, permite que mi seguridad crezca al saber que existes gracias hermano te quiero mucho

**Juana:**

Entereza y fuerza personalidad que solo algunas mujeres poseen, gracias por estar y contar contigo por siempre; te quiero mucho.

**Mónica:**

Alegre, simpática y trabajadora, gran compañía, factores que no se encuentran fácilmente en una mujer, he aprendido muchas cosas de ti, te quiero mucho

**Paty:**

Compartir cosas contigo me ha hecho sentir mucho mejor todo el tiempo, gracias por escucharme. Te quiero mucho

**Martín:**

Aprender juntos muchas cosas ha hecho que exista un vínculo indestructible, gracias hermano menor por el apoyo y confianza mutua, te quiero mucho.

**Sobrinos:**

**Georgy, Martín, Benjamín, Fabricio:**

Cuando llegaron a mi vida comprendí que el amor no tiene límites, me enseñaron a ver la vida de diferente manera y ahora ya son parte de fundamental de ella, los amo.

**Pagaza y Benjamín:**

Llegaron para quedarse

**Jessica:**

Gracias por compartir estos momentos

---

	<b>INDICE</b>	<b>Pagina</b>
<b>I MARCO DE REFERENCIA</b>		9
1.1 Antecedentes		9
1.2 Historia		14
	1.2.1 Empleo de la energía eólica a nivel mundial	14
	1.2.2 Empleo de la energía eólica en México a través del tiempo	16
	1.2.3 Aplicaciones de energía eólica en México	19
	1.2.4 Ejemplo caso de estudio central Eolo eléctrica La Venta Oaxaca	20
	1.2.5 Tecnología de la energía eólica	22
1.3 ¿Que es el viento?		24
	1.3.1 ¿Como se origina?	24
	1.3.2 Disponibilidad	27
	1.3.3 Potencia del viento	28
1.4 Recursos eólicos : vientos globales		28
	1.4.1 La fuerza del coriolis	28
	1.4.2 Como afecta la fuerza del coriolis a los vientos globales	29
	1.4.3 Vientos geostróficos	30
	1.4.4 Vientos de superficie	30
	1.4.5 Vientos locales : brisas marinas	30
	1.4.6 Vientos locales : vientos de la montaña	31
<b>II POTENCIAL EOLICO EN LA REPUBLICA MEXICANA</b>		31
	2.1 Regiones Eolo energéticas de México	31
	2.2 Potencial de aplicación en México	34
	2.3 Medición del recurso	36
<b>III EL VIENTO EN EL VALLE DE MEXICO</b>		37
3.1 Aspectos geográficos del Distrito Federal		37

3.1.1 Ubicación Geográfica	37
3.1.2 Elevaciones principales	38
3.1.3 Fisiografía	39
3.1.4 Geología	39
3.1.5 División delegacional	40
3.1.6 Climas	40
3.1.7 Estaciones meteorológicas	41
3.1.8 Regiones y cuencas Hidrológicas	42
3.1.9 Cuerpos de agua	43
3.2.0 Agricultura y vegetación	43
<b>IV VIENTOS DOMINANTES EN LA CUIDAD DE MEXICO</b>	44
4.1 Vientos dominantes en la Ciudad de México	44
4.2 El viento en el Valle de México	46
4.3 Tablas de viento	51
4.4 Rosas de vientos	54
4.5 Propuesta	56
<b>V APLICACIÓN DE LA TECNOLOGIA PARA TRANSFORMAR LA ENERGIA EÓLICA</b>	61
5.1 ¿Que son los aerogeneradores?	61
5.2 Los aerogeneradores	61
5.2.1 ¿De que están hechos?	61
5.2.2 Aerogeneradores modernos	75
5.2.3 ¿Cómo se instalan?	77
5.2.4 Selección del emplazamiento	81
5.3 Tamaños y posiciones convenientes del rotor	86
5.4 Tamaño de Torres y materiales convenientes	88

<b>VI BENEFICIOS PARA LA ECONOMIA</b>	91
6.1 Cuanto cuesta un aerogenerador	91
6.2 Ingresos y tarifas	95
6.3 Inversiones: Rentabilidad social	98
6.4 Empleo	100
<b>VII MEDIO AMBIENTE</b>	100
7.1 Aerogeneradores y entorno ambiental	100
7.2 Las aves y los aerogeneradores	102
7.3 Ruido en turbinas	103
<b>CONCLUSIONES</b>	105
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	106
<b>GLOSARIO</b>	108
<b>ANEXOS</b>	110



## PRÓLOGO

**“Nos molesta. Nos quema la cara. Nos despeina. Nos da frío. Nos agrada. Nos gusta. Nos ayuda. Es malo. Es bueno. Nos da energía. El viento, desde la anterior descripción lo vemos lleno de contradicciones en cuanto a sus efectos, pero es una de las fuentes de energía más baratas, ya que con el transcurso de los años disminuyen los costes a medida que mejora la tecnología para la energía eólica, que se perfila como una respuesta frente a las energías fósiles contaminantes”.**

EOLO, según la mitología griega, era el dios de los vientos. Hijo de Zeus y la ninfa Menalipa, con sólo inflar sus enormes cachetes podía producir huracanes, sirocos, ventiscas, tempestades e incluso brisas, según su variable estado de ánimo.

Las investigaciones que se realizan actualmente sobre la energía eólica se dirigen a aprovechar el viento como energético para producir electricidad, calor, energía mecánica o cualquier otra forma de energía.

La energía eólica está clasificada como una fuente no convencional. Es prácticamente inagotable y no contamina. Sin embargo, su principal desventaja es que cuando no sopla el viento no se produce energía. Por esta razón es una fuente intermitente y, como tal, requiere de un sistema de almacenamiento para aprovecharla continuamente.

La historia de la energía eólica o de los vientos se remonta al año 3500 a.C., cuando los sumerios armaron las primeras embarcaciones de vela. Después, los griegos construyeron máquinas que funcionaban con el viento. Así, desde la Antigüedad éste ha sido el motor de las embarcaciones. Han pasado 5 000 años y los veleros surcan aún los mares.

JAVIER POSADAS FIGUEROA

*Históricamente las primeras aplicaciones de la energía eólica fueron la impulsión de navíos, la molienda de granos y el bombeo de agua, y sólo hasta finales del siglo pasado la generación de energía eléctrica. Actualmente las turbinas eólicas convierten la energía cinética del viento en electricidad por medio de aspas o hélices que hacen girar un eje central conectado, a través de una serie de engranajes (la transmisión) a un generador eléctrico.*

Existen varias ventajas competitivas de la energía eólica con respecto a otras opciones, como son:

- Se reduce la dependencia de combustibles fósiles.
- Los niveles de emisiones contaminantes, asociados al consumo de combustibles fósiles se reducen en forma proporcional a la generación con energía eólica.

A mediados de los años sesentas (1963) los hermanos Olgyay, propusieron el término de "Diseño Bioclimático" tratando de enfatizar los vínculos y múltiples interrelaciones entre la vida y el clima (factores naturales) en relación con el diseño, también exponen un método a través del cual el diseño arquitectónico se desarrolla respondiendo a los requerimientos climáticos específicos. Mas adelante surgieron otras definiciones como diseño ambiental, eco diseño, diseño natural, biodiseño, etc. En realidad todos tratan de establecer la

## INTRODUCCIÓN

- Las tecnologías de la energía eólica se encuentran desarrolladas para competir con otras fuentes energéticas.
- El tiempo de construcción es menor con respecto a otras opciones energéticas.
- Al ser plantas modulares, son convenientes cuando se requiere tiempo de respuesta de crecimiento rápido.

La investigación y desarrollo de nuevos diseños y materiales para aplicaciones en aerogeneradores eólicos, hacen de esta tecnología una de las más dinámicas, por lo cual constantemente están saliendo al mercado nuevos productos más eficientes con mayor capacidad y confiabilidad.

## MARCO DE REFERENCIA

### ANTECEDENTES

importancia del diseño basado en la relación Hombre – Naturaleza-Arquitectura.

Estos términos fragmentan al concepto de la arquitectura en áreas especializadas. ¿Se puede desligar a la arquitectura de la estructura? La respuesta es no. del mismo modo los espacios no pueden desligarse de su interrelación con el medio ambiente ya que los rodea. Así como la estructura da soporte a la arquitectura, el concepto bioclimático da soporte al bienestar y confort de los usuarios y al uso energético eficiente de la edificación.

Bajo este contexto es que trabaja la arquitectura bioclimática, cuyo principal objetivo es el de armonizar los espacios y crear óptimas condiciones de confort y bienestar para sus ocupantes. Pero la arquitectura bioclimática también atiende los problemas energéticos de la vivienda. Hace un uso eficiente de la energía y los recursos tendiendo hacia la autosuficiencia de las edificaciones. Aplicando el diseño bioclimático se ayuda también a preservar el medio ambiente, integrando al hombre en un ecosistema más equilibrado.

En la actualidad mundial, la arquitectura bioclimática se desarrolla de manera amplia en cualquier tipo de edificaciones tanto en vivienda como en edificios públicos. Todos los aspectos abordados por esta arquitectura son muy importantes pero los más marcados son los de iluminación y climatización natural. El aspecto de climatización se ve más aplicado con mayor frecuencia en la arquitectura de vivienda popular incluyendo la ventilación natural y el uso de materiales que hacen más eficiente esta etapa; mientras que en los públicos se utiliza con mucho más énfasis la ventilación e iluminación natural para el confort total del edificio. Dentro de estos aspectos importantes de la arquitectura bioclimática la ventilación (acción del viento), toma cada vez más fuerza dentro de los aspectos del diseño, tanto así que los edificios están tomando las formas más caprichosas para la captación de este elemento natural e integrarlo al mismo, con la intención de que sea parte del mismo y no un elemento externo. Un ejemplo de esto lo han realizado algunos arquitectos alrededor del mundo como es el caso de Richard Rogers<sup>1</sup> uno de los arquitectos que han

---

<sup>1</sup> arquitecto británico fundador, junto a otros, de la tendencia conocida como alta tecnología. Es uno de los pocos arquitectos

utilizado la ventilación natural y la ventilación forzada de una manera primordial en sus proyectos, la "Torre Turbina en Tokio Japón" tiene un diseño que es capaz de generar suficiente energía por sí mismo. Este proyecto nos muestra la flexibilidad con que aprovecha la variabilidad de los vientos de la ciudad de Tokio, pruebas de esto es el túnel de viento que analiza las condiciones de los vientos urbanos locales."<sup>2</sup>

Como todos los edificios que se basan en algún concepto especial, éste tiene la peculiaridad de los malgafs o torres eólicas del Medio Oriente y canaliza el aire hacia unos captadores de viento, los cuales lo transportan a través de tubos subterráneos a un intercambiador de calor por medio de agua fría. Este aire acondicionado de manera natural, es inyectado a los distintos espacios y niveles del edificio. Posteriormente, el aire caliente, generado en los espacios, es succionado por una gran torre que aprovecha las diferencias térmicas por el efecto Stack<sup>3</sup>, las cuales son incrementadas por captadores solares en la parte superior. La fachadas son otros elementos importantes para la ayuda de no ganancia de calor dentro del inmueble, en este aspecto el edificio cuenta con una fachada doble ventilada que controla el asoleamiento.

Las formas aerodinámicas que puedan presentar los edificios le ayudarán a acelerar los vientos dominantes, y poder así extraer el aire caliente a la parte superior, para

---

británicos que disfrutaban de un prestigio internacional avalado por numerosos encargos en muchos países.

<sup>2</sup> Victor Fuentes Freixanet, Tecnología y Diseño en la Edificaciones. UAM - .1998

<sup>3</sup> Succión de aire caliente en la parte superior e inyección de aire frío en la parte inferior

poder ayudar al enfriamiento natural del edificio; un ejemplo de esto lo podemos observar en otra obra de Rogers en el Edificio de Rentas publicas en el Reino Unido, el cual presenta éstas características tan importantes para su diseño. Existen muchos arquitectos en la actualidad que están generando una nueva corriente arquitectónica que reúne uno a varios elementos de los antes mencionados, para el desarrollo de sus obras, creando edificios capaces de mantener el confort dentro de ellos mismos, interactuando con la naturaleza y aprovechando los recursos que ésta nos brinda; podré citar a algunos de ellos que han sido los mas representativos para esta nueva corriente de arquitectura bioclimatica que han revolucionado las técnicas del diseño a partir del elemento viento; uno de ellos es Norman Foster<sup>4</sup>, Renzo Piano<sup>5</sup>, Michael Hopkins, Kiessier-Parther, entre otros. Todos ellos con obras importantísimas alrededor del mundo, llevando el estandarte de el diseño a partir del viento. En México no se difunden tanto las nuevas técnicas de diseño a partir de los conceptos antes mencionados; sin embargo se ha tratado de incursionar en este conocimiento a través de las escuelas de arquitectura creando talleres, especialidades, conferencias, maestrías y doctorados. Un ejemplo de esto se encuentra en la Universidad Autónoma Metropolitana, en la cual se encuentra uno de los laboratorios de diseño bioclimático mas importantes de México. Dentro de este podemos encontrar aparatos que nos muestran los aspectos climáticos y de

---

<sup>4</sup> Arquitecto británico uno de los mas prestigiosos del panorama internacional a partir de los inicios de la década de los 80's.

<sup>5</sup> Arquitecto italiano que alcanzo gran prestigio internacional al combinar en sus edificios estructuras innovadoras con un original uso de los materiales y la preocupación del entorno urbano

asoleamientos para hacer pruebas previas a algún edificio y así saber como se comportará de acuerdo a las condiciones en las que se desarrollará el inmueble.

La ciencia y la tecnología son desde hace mucho tiempo parte esencial del desarrollo integral de una sociedad. Sin duda el desarrollo tecnológico de un campo, como es el de las edificaciones, reviste una gran importancia para el desarrollo integral de un país. Detrás de él, esta la ciencia; la investigación básica y la ciencia aplicada, que son la base de la tecnología, que si ellas, la tecnología materialmente no podría existir. La ciencia enriquece el conocimiento del ser humano y aplica este conocimiento para observar el comportamiento específico de algún elemento o conjunto de elementos y la tecnología normalmente culmina en el diseño y la producción de objetos, a partir de esos conocimientos previamente investigados y aplicados.

De alguna manera la tecnología es la práctica de la ciencia que por medio de una transformación del conocimiento científico o teoría la convierte en productos tangibles a través de una interfaz llamada diseño y producción. La tecnología es el ingrediente que ha permitido la aplicación de la ciencia a la solución de los problemas prácticos del ser humano. Hoy en día, la tecnología debe de tener tomar en cuenta otro objetivo fundamental que es el de la búsqueda del bienestar humano, la naturaleza y el equilibrio ecológico; lo que se conoce como diseño sustentable. Es por esto que la arquitectura ha tratado desde siempre implementar la tecnología en su tratado, basándose en las necesidades elementales del ser humano para el desarrollo de su evolución adecuado a través del tiempo.

Los mecanismos de confort de los inmuebles desde sus inicios se han ido modificando dependiendo de la época en que se encuentren, a través del tiempo la tecnología que se aplicaba es la que se tenía al alcance; pero no en todos los casos resultaba eficiente, esto se refleja cuando un edificio no respondía a las necesidades específicas que se buscaba solucionar.

Generalmente la arquitectura se basa en el diseño (forma y función), que es su parte fundamental, sin dejar a un lado los materiales y las condiciones naturales que intervendrán en el proyecto. Los usuarios ahora buscan lugares más agradables para desarrollar sus actividades primordiales, al mismo tiempo que se integren a los espacios para el desahogo de sus emociones y sentimientos; por lo regular lo que buscan no lo encuentran fácilmente ya que los edificios no están planeados para tales fines; la mayoría de ellos solo responden a reglamentos básicos de construcción que dejan a un lado el confort básico, necesario e integral del inmueble. Sin embargo cada vez los constructores buscan la posibilidad de que sus construcciones respondan a las necesidades y requisitos que harán que su obra se adapte a todas las condiciones, especialmente a las climáticas que son parte fundamental para el desarrollo de la nueva arquitectura. A medida de que nosotros contribuyamos a la creación de arquitectura sustentable, basada en crear nuestra energía a partir de los factores climáticos-ambientales, para solucionar las necesidades humanas que en un inmueble se requieran, ayudaremos a la no contaminación, ya que al crear nuestra propia energía, esta no será extraída por medios artificiales que contaminan el ambiente y desgastan la atmósfera terrestre. En la actualidad existen pocos tratados que nos acerquen a las construcciones donde el

concepto principal sea el medio ambiente en el que se desenvolverán los edificios, aprovechando las condiciones climáticas, para crear conceptos de diseño de ellas, por ejemplo el sol, el viento, el agua, y la tierra, que son los cuatro elementos fundamentales, para el origen de la vida.

La arquitectura se encuentra en un momento fundamental para la historia de la humanidad, ya que se están acabando los espacios debido al crecimiento de la población y a la carencia de los recursos. Por eso es que se requieren aplicaciones de conceptos ambientales para rescatar parte de lo que hemos perdido; la adecuación al medio.

Por otra parte con respecto a la utilización del viento en específico y su utilización con tecnología avanzada actualmente más de 15.000.000 millones de KV/H de electricidad se generan anualmente en todo el mundo. De esto, cerca de el 65% es producido quemando combustibles fósiles y el resto se obtiene de otras fuentes, incluyendo nuclear, hidroelectricidad, geotérmica, biomasa, solar y el viento. Solamente cerca del 0.3% de esta energía es producida convirtiendo la energía cinética del viento en energía eléctrica, sin embargo, el uso del viento para la producción eléctrica se ha estado extendiendo rápidamente en años recientes, debido en gran parte a las mejoras tecnológicas, la maduración de la industria y una creciente preocupación por las emisiones asociadas a la quema de combustibles fósiles. Todavía hay mucho lugar para crecer, pues solamente una porción pequeña del recurso utilizable del viento está siendo aprovechada. Mediante las regulaciones a la industria eléctrica, así como con incentivos por parte de los gobiernos, desempeñan un

importante papel determinante en cuanto rápidamente se adoptará la energía eólica. Las políticas eficaces ayudarán a allanar el camino y asegurarán de que la energía eólica pueda competir con otras fuentes de energía en el mercado de la electricidad. Es por esto que:

El objetivo final que se pretende alcanzar en la investigación a desarrollar es la aplicación de los conocimientos adquiridos, durante la búsqueda fundamentada en campo y bibliográfica de los elementos, sus características y comportamiento en el medio, para obtener un modelo y crear una propuesta para la generación de energía de una manera limpia y eficaz a partir del análisis de los aspectos más importantes que sobre el tema se han abordado utilizando bases científicas para tal efecto; partiendo de los elementos básicos del diseño que responderán a las condiciones de las fluctuaciones, velocidades y vientos dominantes, que existen en una zona determinada, en este caso la Ciudad de México, así como la aplicación de los materiales vanguardistas y estructuras que se puedan adaptar a estas condiciones y para ello será necesario desarrollar lo siguiente:

- Integrar los estudios previos de la utilización de energía eólica.
- Analizar el viento y como se origina
- Profundizar en la tecnología aplicable para este recurso
- Estudio completo del sistema de vientos dominantes en la Ciudad de México, basado en cartas del Servicio Meteorológico Nacional, para aprovechamiento de este gran recurso natural.

Si la arquitectura ha de tomar un papel fundamental en la creación del nuevo medio ambiente que nos rodeará en el futuro, y si ésta formará parte de nuestro nuevo sistema ecológico, será necesario que responda a las siguientes cuestiones ¿Será lo suficientemente sustentable para poder aplicarse a cualquier parte de México? ¿Responderá a las necesidades ecológicas y sociales que se le presenten? ¿Integrará los elementos necesarios para mantener el confort de nuestros edificios? ¿Podrá la nueva arquitectura aprovechar los nuevos descubrimientos que en materia de clima y energía que se tengan? ¿Los materiales para los sistemas constructivos serán más versátiles y biodegradables? ¿Se podrán mejorar las técnicas de captación de elementos climáticos para crear energía? ¿Cuánto tiempo falta para organizar a la arquitectura en niveles climáticos y de diseño? ¿Algún día nos faltaran los factores climáticos? ¿El viento, el sol, el agua y la tierra serán en el futuro verdaderos conceptos de diseño para las nuevas ciudades?. Todas estas preguntas tendrán una respuesta en un futuro no muy lejano, para el cual nosotros tendremos que trabajar trazando nuevos caminos para llegar a cumplir los objetivos que nos planteamos con respecto al desarrollo de una nueva cultura arquitectónica. Mi investigación propone plantear durante el proceso de investigación LA SIGUIENTE **HIPOTESIS**:

*“Bajo la concepción del viento como base de la energía eólica, y conociendo su intensidad en la ciudad de México se puede obtener una cantidad de energía eléctrica suficiente para poder beneficiar a una parte de la población de la delegación Tlalpan de una manera limpia e inagotable ya que no*

*produce ninguna emisión y no se agota en un corto plazo”.*

## **HISTORIA**

### **1.2.1 Empleo de la energía eólica a nivel mundial**

La energía eólica ha sido aprovechada como fuerza motriz en la navegación y para generar energía mecánica en molinos de granos y bombas de agua desde tiempos muy remotos. Solo desde el siglo pasado se comenzó a aprovechar para generar energía eléctrica.

Los egipcios navegaban el Nilo con embarcaciones de vela 3000 años a. de C. Los molinos de viento parecen haberse originado en Persia hace unos 2000 años. Estos primeros molinos eran de eje horizontal y movían un par de piedras redondas sin emplear engranes.

La primera mención explícita sobre molinos de viento en Europa data de 1105, en Inglaterra hay referencias a molinos de viento de 1143. Los molinos de viento adquieren su mayor importancia en el medievo para la molienda de granos, en Canterbury, Inglaterra alrededor de 1260.

En 1332 los molinos aparecen en Venecia en 1341 el Obispo de Utrech intentó establecer autoridad sobre los vientos que soplaban en su provincia. Hacia el siglo XV los molinos de viento y agua se habían convertido ya en el complemento más importante de la fuerza humana y animal. Durante el siglo XVII la tecnología de molinos estaba ya bastante desarrollada, siendo los holandeses los mas avanzados, se estima que para entonces existían

unos 10,000 molinos de viento entre 10 y 20 HP cada uno (unos 110 MW) en Inglaterra y unos 12,000 en los países bajos (unos 125 MW).

En 1745 el inglés E. Lee invento la cola de molino, lo que permite que este se oriente en forma perpendicular al viento maximizando así la energía captada. Hacia finales del Siglo XVIII los holandeses tenían instalados unos 20,000 molinos de viento, aproximadamente 400 MW en total. Las aplicaciones de la energía eólica se extendieron a la industria del papel y los aserraderos.

A principios del Siglo XIX el aprovechamiento de la energía eólica en las industrias europeas empezó a declinar como consecuencia del desarrollo de las máquinas de vapor. Durante este siglo el principal objeto de atención en los desarrollos tecnológicos de molinos fueron las aspas y la forma de controlar automáticamente la velocidad del eje de rotación, (frenos de aire, gobernadores centrífugos, etc). A finales del Siglo XIX los daneses habían conquistado el liderazgo tecnológico del recurso eólico y se estima que tenían instalados unos 10,000 molinos de viento (aproximadamente 1,000 MW). A mediados del siglo, D. Halladay introdujo las aerobombas en Estados Unidos. Posteriormente en 1883 S. Perry las fabrico en acero y su diseño fue copiado en todo el mundo ya que era barato y confiable aunque ineficiente. Durante este mismo siglo se construyeron en Estados Unidos seis millones de molinos, de los cuales 150,000 están aún en operación.

El desarrollo de molinos para generar electricidad se generalizó fines del Siglo XIX y principios del XX. El primer aerogenerador de energía eléctrica fue diseñado por P. Lacour en Dinamarca y entro en operación en 1890, poco tiempo después que el primer generador eléctrico de vapor.

Hacia 1916 en Dinamarca se tenían en operación más de 1,300 aerogeneradores con una generación de 500 GWh al año. En Estados Unidos, antes del inicio de su programa de electrificación rural. En la década de 1930, los pequeños molinos de viento de menos de medio kilowatt eran prácticamente la única fuente de energía eléctrica disponible en zonas rurales.

En 1929 los franceses construyeron en Bourget un aerogeenrador con aspas de 20 m de diámetro colocada sobre una torre de 10 m de altura y una capacidad de 15 kW a una velocidad de viento de 6 m/s.

En 1931 en la Unión Soviética se construyó un aerogenerador con aspas de 30.5 m de diámetro y una torre de 23 m de altura. La capacidad de generación era de 100 kW a 11.1 m/s y produciendo 280 MWh al año.

Entre 1941 y 1945 en Estados Unidos se construyó la unidad Smith-Putnam que sería la más grande del mundo hasta 1978, su rotor tenía dos aspas de 53 m de diámetro, montado sobre una torre de 33 m de altura y con una potencia nominal de 1.25 MW a 13.4 m/s. Después de 1100 horas de operación un aspa defectuosa para la operación y con eso el experimento.

En 1942 en Dinamarca se puso en operación un sistema eólico de 45 kW en la Isla de Bogø, con un rotor de 13.4 m de diámetro y tres aspas.

Entre 1959 y 1957 en Dinamarca, cerca de Gedser, se construyó un aerogenerador con una potencia nominal de 200 kW que después de un periodo inicial de prueba operó normalmente desde 1959 hasta 1967. Durante este periodo proporcionó un total de 2,242 MWh. Las características básicas eran un rotor de tres aspas de 24 m, viento abajo, eje horizontal, que operaba a 30 rpm con una velocidad de viento de diseño de 15 m/s pero podía aceptar vientos de 5 a 38 m/s.

En 1957 en Francia se instalo una unidad de 800 kW y en 1963 otra de 1 MW. Aunque la investigación para el aprovechamiento del viento continuo, el bajo precio de los hidrocarburos desalentó en gran medida esta practica durante el periodo 1950-1970, posterior a esto los programas eólicos retomaron importancia a un ritmo acelerado. En Estados Unido bajo el patrocinio de la NASA se construyó una planta generadora de 100 MW en Ohio en 1975.

En 1977 un aerogenerador canadiense tipo Darrieus de 200 kW, se conectó a la red de Islas Magdalena en el Golfo de San Lorenzo. Como parte del programa de la NASA entro en operación una unida de 1.5 MW, y en Dinamarca entró en operación otro más de 2 MW con dos aspas y un costo aproximado de 350,000 USD.

En 1973 el Gobierno Federal de los Estado Unidos aportó 300,000 USD para el programa de viento, para 1980 este



presupuesto se había incrementado a 67 millones de dólares.

### **1.2.2. Empleo de la energía eólica en México a través del tiempo**

"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 dos 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 conociéndose 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"<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> [www.conae.gob.mx](http://www.conae.gob.mx)

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 desarrollo 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 superdelgada 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 Watts, 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 disseminación.

### **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, en base a un 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 Volts 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 optimar 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”<sup>7</sup>.

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

---

<sup>7</sup> [www.conae.gob.mx](http://www.conae.gob.mx)

“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, Mor.

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 desarrollo también alrededor del concepto de la vela, sin usar una tela de alta resistencia, alto costo y de importación, sino un remedo semi rígido 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's-, 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 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 Watts, utilizando un alternador de automóvil, el que producido industrialmente con un generador de imanes permanentes sería nominalmente de 500 Watts. 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 es objeto de patentes en trámite, por soluciones novedosas en los mecanismos de control y ensamble. El Avispa, equivalente ahora a seis paneles fotovoltaicos de 50 Watts 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)<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup> ibidem

En el IIE se desarrollo también un pequeño aerogenerador de 50 Watts 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 ha mantenido 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.

Al lado de estas actividades, 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. El Instituto de Ingeniería de la UNAM junto con el Centro de Investigaciones Biológicas de Baja California Sur, que 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 eoloelectrica de 1,575 kW, constituida por 7 aerogeneradores 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.

### **1.2.3 Aplicaciones de energía eólica en México**

#### **Casos exitosos (Experiencias en México).**

Proyectos:

- o Desarrollo de los Aerogeneradores Ehecatl de pequeña potencia
- o Aerogenerador Fénix

- Instalación demostrativa de un aerogenerador de 250 kW en las salinas de Guerrero Negro BCS
- Instalación de un aerogenerador de 600 kW en Guerrero Negro BCS
- Central Eoloeléctrica de la Venta Oaxaca (CFE)
- X-Calak
- Sta. Ma. Magdalena
- El Junco
- La Gruñidora
- Ignacio Allende y El Calabazal
- San Antonio Agua Bendita (LyFC)

#### **1.2.4 Ejemplo caso de estudio Central Eoloeléctrica La Venta Oaxaca**

La Central de La Venta se localiza en el sitio del mismo nombre, a unos 30 kilómetros al noroeste de la ciudad de Juchitán, Oaxaca. Fue la primera planta eólica integrada a la red en México y en América Latina, con una capacidad instalada de 1.575 MW.



[www.cfe.com.mx](http://www.cfe.com.mx)

Ubicada en el ejido de La Venta, Municipio de Juchitán de Zaragoza Oaxaca, al norte de este ejido, en el Istmo de Tehuantepec, a 30 kilómetros al noroeste de la ciudad de Juchitán de Zaragoza, Oaxaca.

Fue la primera Central eólica integrada a la red eléctrica en México y también fue la primera en su tipo en América Latina.

La tecnología denominada Eoloeléctrica, para generar energía eléctrica, se basa en el principio de transformar la energía del viento en energía eléctrica, para lo cual se usan los aerogeneradores que consisten en una torre tubular cónica de 31.5 m. de altura, sobre la cual están montadas en su extremo superior tres aspas o álabes con un diámetro de giro de 27 m. y cuyo diseño permite aprovechar la energía del viento, en los rangos de 5 a 25 metros por segundo. Estas aspas o álabes, están conectadas a un rotor que lleva acoplado el generador

eléctrico, obteniéndose así la transformación a energía eléctrica.

Con velocidades de viento inferiores a 5 metros por segundo el aerogenerador no genera energía eléctrica, por encima de 25 metros por segundo las aspas del rotor se alinean (girando sobre su eje) con el viento automáticamente, deteniendo de esta manera su giro para evitar daños a los equipos, además los aerogeneradores cuentan con un sistema de control automático que permite variar la orientación del aerogenerador, con la finalidad de aprovechar en forma óptima los vientos en la velocidad y dirección en que se presenten.

En las instalaciones de esta Central se cuenta con siete unidades (aerogeneradores) de 225 KW. cada una, con una capacidad total de 1,575 kW., y la separación entre una y otra unidad es de 60 metros. Esta Central entró en operación comercial el 10 de noviembre de 1994.

La energía generada por la Central se envía a través de la subestación eléctrica que consta de tres transformadores elevadores de potencial de 480 V a 13,800 V, con capacidades de 500 KVA. dos de ellos y el otro de 750 KVA.; cuenta también con un restaurador para protección de la Central y cuchillas seccionadoras después de cada transformador y antes de la conexión a la línea de 13.8 KV.

La Venta, eoloeléctrica

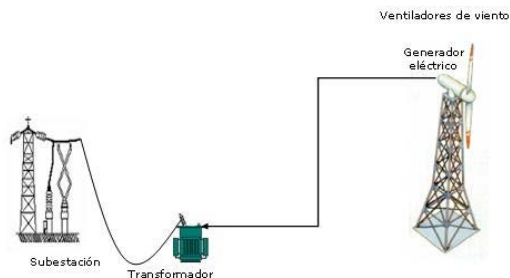
#### Ficha Técnica

Autogeneradores	Unidades 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7
Marca	Vestas (empresa de Dinamarca)
Capacidad de cada unidad	225 KW.
Capacidad instalada	1,575 KW.
Altura de las torres	31.5 mts.
Orientación de las torres	Este-oeste en línea recta
Dirección de los vientos predominantes	Norte-sur
Rango de aprovechamiento del viento	5 a 25 metros por segundo
No. de aspas (álabes)	3
Diámetro de giro de las aspas (álabes)	27 metros
Velocidad de giro en el generador	900 / 1200 r.p.m.
Voltaje de generación	480 Volts
Frecuencia	60 Hz.
Tipo de generador eléctrico	Asíncrono
Voltaje del generador eléctrico	3 x 480 Volts
No. de polos del generador eléctrico	6-8
Velocidad nominal	1209-906 r.p.m.
Población que alimenta	El Porvenir, Unión Hidalgo y la Venta.

### 1.2.5 Tecnología de la energía Eólica

La energía cinética del viento puede convertirse en energía mecánica rotacional en forma directa, cuando se extrae por medio de superficies que están en contacto directo y acopladas a motores mecánicos, o en forma indirecta, cuando interviene un elemento intermedio para su conversión. La energía mecánica rotacional puede ser convertida a eléctrica.

Los aerogeneradores constituyen el principal elemento de los sistemas de aprovechamiento de la energía eólica, los cuales están constituidos por un arreglo de aspas, generador y torre principalmente; se encuentran generalmente agrupados en centrales o parques eólicos para la optimización del recurso. Este tipo de central convierte la energía del viento en energía eléctrica, mediante una aeroturbina que hace girar un generador. La energía eólica está basada en aprovechar un flujo dinámico de duración cambiante y con desplazamiento horizontal. La cantidad de energía obtenida es proporcional al cubo de la velocidad del viento, lo que muestra la importancia de este factor.



Los aerogeneradores aprovechan la velocidad de los vientos comprendidos entre 5 y 20 metros por segundo. Con velocidades inferiores a 5 metros por segundo, el aerogenerador no funciona y por encima del límite superior debe pararse, para evitar daños a los equipos.

Un sistema conversor de energía eólica se compone de tres partes principales: (i) el rotor, que convierte la energía cinética del viento en un movimiento rotatorio en la flecha principal del sistema; (ii) un sistema de transmisión, que acopla esta potencia mecánica de rotación de acuerdo con el tipo de aplicación. Aplicación para cada caso, es decir, si se trata de bombeo de agua el sistema se denomina aerobomba, si acciona un dispositivo mecánico se denomina aeromotor y si se trata de un generador eléctrico se denomina aerogenerador.

El rotor puede ser de eje horizontal o vertical, éste recupera, como máximo teórico, el 60% de la energía cinética del flujo de viento que lo acciona. Esta formado por las aspas y la maza central en donde se fijan éstas y se unen a la flecha principal; el rotor puede tener una o más aspas. Un rotor pequeño, de dos aspas, trabaja a 900 revoluciones por minuto (rpm), en tanto que uno grande, de tres aspas y 56 metros de diámetro, lo hace a 32 rpm. El rotor horizontal de tres aspas es el más usado en los aerogeneradores de potencia, para producir electricidad trifásica conectada a los sistemas eléctricos de las empresas suministradoras.

La transmisión puede consistir en un mecanismo para convertir el movimiento rotatorio de la flecha en un movimiento recíprocante para accionar las bombas de émbolo de las aerobombas, que en el campo se utilizan

para suministrar agua a los abrevaderos del ganado o a las viviendas. Para la generación de electricidad normalmente se utiliza una caja de engranes para aumentar las revoluciones a 900, 1,200 ó 1,800 rpm, para obtener corriente alterna trifásica de 60 ciclos por segundo.

En la actualidad, la generación de electricidad es la aplicación más importante de este tipo de sistemas. Los aerogeneradores comerciales alcanzan desde 500 hasta 1,000 kW de potencia nominal, tienen rotores de entre 40 y 60 m de diámetro y giran con velocidades que van de las 60 a las 30 rpm. Los generadores eléctricos pueden ser asíncronos o síncronos, operando a una velocidad y frecuencia constante, que en México es de 60 hz.. En el caso de aerogeneradores con potencias inferiores a los 50 kW también se utilizan generadores de imanes permanentes, que trabajan a menor velocidad angular (de entre 200 y 300 rpm), que no necesitan caja de engranes y que, accionándose a velocidad variable, pueden recuperar mayor energía del viento a menor costo.

Un sistema conversor de energía eólica es tan bueno como su sistema de control. La fuerza que ejerce el viento sobre la superficie en que incide es función del cuadrado de la velocidad de éste. Rachas de más de 20 metros por segundo, que equivalen a más de 70 km/hora, pueden derribar una barda o un anuncio espectacular, e incluso dañar un aerogenerador si éste no está bien diseñado o su sistema de control esta fallando.

En los aerogeneradores de potencia, el sistema de control lo constituye un microprocesador que analiza y evalúa las condiciones de operación considerando rumbo y

velocidad del viento; turbulencia y rachas; temperaturas en el generador, en la caja de transmisión y en los baleros de la flecha principal. Además, muestrea la presión y la temperatura de los sistemas hidráulicos de los frenos mecánicos de disco en la flecha; sus rpm, así como los voltajes y corrientes de salida del generador. Detecta vibraciones indebidas en el sistema, optando por las mejores condiciones para arrancar, parar, orientar el sistema al viento y enviar señales al operador de la central eoloeléctrica sobre la operación del mismo.

La torre que soporta al aerogenerador de eje horizontal es importante, ya que la potencia del viento es función del cubo de su velocidad y el viento sopla más fuerte entre mayor es la distancia más alto del suelo; por ello, el eje del rotor se sitúa por lo menos a 10 metros en aerogeneradores pequeños y hasta 50 o 60 metros del suelo, en las máquinas de 1000 kW. En un aerogenerador de 500 kW son típicas las torres de 40 metros, y estas pueden ser de dos tipos: La tubular, recomendada en áreas costeras, húmedas y salinas, y la estructural o reticular, propia de regiones secas y poca contaminación atmosférica, por ser más baratas y fáciles de levantar. A partir de las diversas experiencias internacionales de operación de grandes conjuntos de aerogeneradores modernos, constituyendo centrales eoloeléctricas, de 1980 a 1995 se evolucionó de la máquina de 50 kW a la de 500 kW, estando actualmente en proceso de introducción las unidades de 750 y 1000 kW, las que se consideran el tope para este tipo de arquitectura y tecnologías actuales de grandes aerogeneradores.

La tecnología de materiales alrededor de los materiales compuestos, que permitan estructuras más esbeltas y ligeras, más resistentes a la oxidación y la corrosión, y



más fuertes a la vez, así como de supermagnetos en los generadores, permitirán desarrollar nuevos conceptos más confiables y económicos, desde unidades de decenas de Watts hasta grandes aerogeneradores de potencia, trabajando en régimen de velocidad variable, aprovechando mejor la energía del viento y constituyendo junto con la energía hidroeléctrica, el soporte principal de la generación eléctrica en los sistemas nacionales. Para fines del año 2000 se esperan estar instalados en el mundo, más de 14,000 MW. En Europa, Alemania, Dinamarca, el Reino Unido, España y Grecia tienen los programas más ambiciosos. En España, la empresa eléctrica de la Provincia de Navarra tiene planeada la instalación de 54 Centrales eoloelectricas y espera producir más del 50% de la energía que distribuye. La empresa eléctrica de la Provincia de Euskadi (País Vasco) también prevé un desarrollo importante, lo que ha ocasionado, paradójicamente, que grupos ecologistas protesten por lo que consideran excesivo.

Para el año 2020, la Asociación Europea de Energía Eólica, estima tener más de 20,000 MW instalados de potencia eólica para generación de electricidad. China y la India son dos países que han decidido dar un impulso grande a esta forma de generación eléctrica, para lo cual se han asociado con empresas europeas para fabricar en esos países el equipamiento requerido. En América Latina, Costa Rica y Argentina llevan la delantera, con 20 y 9 MW respectivamente. En Argentina son las empresas eléctricas cooperativas de la Patagonia las que han dado el impulso, amén de que las leyes estatales de la Provincia de Chubut, obligan a un 10% de la generación eléctrica con energía eólica. México tiene una central de

1,575 kW en la Venta, Oaxaca, con planes de ampliarla a 54 MW. Nicaragua también tiene planes de instalar una central eólica de al menos 30 MW. En el Caribe, la empresa eléctrica de Curazao opera desde marzo de 1994 una centralita de 4 MW que fue la primera eoloelectrica en América Latina y el Caribe.

### 1.3.1 Que es el viento y como se origina

#### ¿Qué es viento?

“El **viento** es el desplazamiento horizontal de las masas de aire, causado por las diferencias de presión atmosférica, atribuidas a la **variación de temperatura** sobre las diversas partes de la superficie terrestre. Es decir, las distintas temperaturas existentes en la tierra y en la atmósfera, por la **desigual distribución** del calentamiento solar y las diferentes propiedades térmicas de las superficies terrestres y oceánicas, producen corrientes de aire. Las masas de aire más caliente tienden a subir y en su lugar se ubican masas de aire más denso y frío.

Lo que caracteriza a los vientos son la **intensidad** y la **dirección**. La primera se mide según la escala de Beaufort que va desde el 0 (calma absoluta) hasta el 12 (huracán). La **intensidad** es directamente proporcional a la diferencia de presión entre el lugar de origen del viento y el de su llegada. Por otra parte la dirección está relacionada con la rotación terrestre.

Al formarse un **área ciclónica** el viento se desvía a la derecha en el hemisferio norte y a la izquierda en el hemisferio sur. Lo contrario sucede en las **zonas**

**anticiclónicas** donde el viento corre hacia la izquierda en el hemisferio boreal y hacia la derecha en el austral.

Dependiendo de la dirección que adquieran los vientos se dividen en **constantes**, que soplan todo el año en la misma dirección aunque la intensidad varía, y en **periódicos**, que no tienen regularidad en su dirección.

Los vientos se clasifican en: dominantes, estacionales, locales, ciclónicos y anticiclónicos.



En las **áreas anticiclónicas** la presión es superior a lo normal a diferencia de las **ciclónicas** donde la presión es inferior a lo normal.

El aire nunca se encuentra en absoluta calma, porque en las áreas ciclónicas se forma una especie de vacío a donde acuden las masas de aire vecinas que están a presión más alta. Son estos movimientos de masas de aire los llamados "vientos".

En las **áreas anticiclónicas** la presión es superior a lo normal a diferencia de las **ciclónicas** donde la presión es inferior a lo normal.

El aire nunca se encuentra en absoluta calma, porque en las áreas ciclónicas se forma una especie de vacío a donde acuden las masas de aire vecinas que están a presión más alta. Son estos movimientos de masas de aire los llamados "vientos"<sup>9</sup>.

### Dominantes

Los **vientos dominantes** se encuentran en la zona del ecuador, que se caracteriza por las bajas presiones. En este lugar hay vientos suaves, llamados calma, y tormentas que se ubican sobre el océano. El aire es sofocante y caliente.

Los vientos se denominan según la dirección desde la que soplan, los vientos de las latitudes medias se califican como dominantes del oeste, muy modificados por las variaciones ciclónicas y anticiclónicas que provocan cambios diarios de las direcciones.

Las regiones más frías de los polos tienden a ser centros de alta presión, en particular en el hemisferio sur, y los vientos dominantes que parten de estas áreas se desvían para convertirse en los vientos polares del este.

### Los vientos locales

En verano la tierra está más caliente que el mar durante el día y más fría durante la noche: esto provoca brisas dirigidas hacia tierra de día y hacia el mar de noche.

### Viento estacional

---

<sup>9</sup> [www.windpower.org](http://www.windpower.org)

La temperatura del aire sobre la superficie terrestre es más cálida en verano y más fría en invierno que el aire sobre el océano adyacente en una misma estación. Durante el verano, los continentes son lugares de presión baja con vientos que soplan desde los océanos, que están más fríos. En invierno, los continentes albergan altas presiones, y los vientos se dirigen hacia los océanos, ahora más cálidos. El viento monzón es un ejemplo de viento estacional. Se caracteriza por ser un viento que cambia de dirección según las estaciones del año. Este viento sopla desde el Suroeste, entre abril y octubre, y en dirección Noreste, desde octubre a abril. El monzón del suroeste, o de verano, suele estar acompañado por fuertes lluvias en zonas de la India y de Indochina.

### Medición

El aparato empleado para medir la dirección del viento es la veleta que marca la dirección. La velocidad del viento se mide con el **anemómetro**, que es un molino de tres brazos, separados por ángulos de 120°, que se mueve alrededor de un eje vertical. Los brazos giran con el viento y permiten medir su velocidad. Hay **anemómetros** de reducidas dimensiones que pueden sostenerse con una sola mano que son muy prácticos aunque menos precisos.

### Escala de vientos Beaufort

Fue diseñada en 1805 por el hidrógrafo irlandés Francis Beaufort. Marineros y meteorólogos la utilizan para indicar la velocidad del viento.

Fuerza del viento

Velocidad del viento en km/h  
Denominación del viento

Nº de escala	Mts/seg	Km/h	Mil/h	Denominación
0	0-0.5	0-1	0-1	calma
1	0.6-1.7	2-6	2-3	ventolina
2	1.8-3.3	7-12	4-6	suave
3	3.4-5.2	13-18	7-10	leve
4	5.3-7.4	19-26	11-14	moderado
5	57.5-9.8	27-35	15-19	regular
6	9.9-10.4	36-44	20-24	fuerte
7	12.5-15.2	45-54	25-30	muy fuerte
8	15.3-18.2	55-65	31-35	temporal
9	18.3-21.5	66-77	36-41	temporal fuerte
10	21.6-25.1	78-90	42-48	temporal muy fuerte
11	25.2-29	91-104	49-56	tempestad
12	más de 29	más de 104	más de 56	Huracán

www.semar.com.mx

### 1.3.2 Disponibilidad

Como todos sabemos casi todos los tipos de energías renovables, con excepción de la geotérmica y la maremotriz provienen del sol. El sol irradia 174.423.000.000.000 kWh de energía por hora hacia la Tierra. En otras palabras, la Tierra recibe  $1,74 \times 10^{17}$  W de potencia<sup>10</sup>. Aproximadamente del 1 al 2% de la energía proveniente del sol se convierte en energía eólica, esto supone una energía alrededor de 50 a 100 veces mayor a la conocida como biomasa, convertida por todas las plantas del planeta<sup>10</sup>.

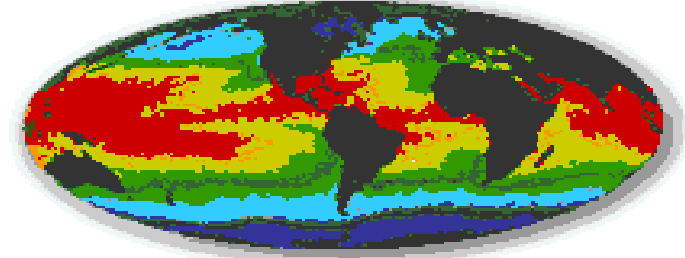
Las diferencias de temperatura conllevan a la circulación del aire. Todas las regiones que se encuentran en la región o alrededor del ecuador, son más calentadas por el sol que otras regiones del resto del globo. En la imagen siguiente, las áreas más calientes se encuentran indicadas con colores como el rojo, naranja y amarillo; esta imagen es de rayos infrarrojos de la superficie del mar y nos indica entonces los lugares más calientes de la tierra.

Por las condiciones físicas el aire caliente es más ligero que el aire frío, por lo que subirá hasta una posible altura de 10 km. Aproximadamente, y su extensión será hacia el norte y hacia el sur. Por lógica si suponemos que el globo no rotase, entonces el aire solo viajaría hacia dos direcciones el norte y el sur, para luego descender ya bajar hacia el origen que fue el ecuador. "La potencia emitida por el Sol sobre la superficie de la esfera que tiene al Sol como su centro y el radio promedio de la trayectoria terrestre es de  $1.37 \text{ kW/m}^2$ . La potencia incide sobre un disco circular con un área de  $1.27 \times 10^{14}$

<sup>10</sup> Vide. [www.windpower.com](http://www.windpower.com)

$\text{m}^2$ . La potencia emitida a la Tierra es, por tanto, de  $1.74 \times 10^{17}$  W.

En promedio, la producción primaria neta de las plantas está alrededor de  $4.95 \times 10^6$  calorías por metro cuadrado y por año. Esto la producción primaria neta global, es decir, la cantidad de energía disponible en todos los posteriores eslabones de la cadena alimenticia/energética. El área de la superficie de la Tierra es de  $5.09 \times 10^{14} \text{ m}^2$ . Así pues, la cantidad de potencia neta almacenada por las plantas es de  $1.91 \times 10^{13}$  W, lo cual equivale al 0.011% de la potencia emitida a la Tierra<sup>11</sup>.



© 1998 [www.WINDPOWER.org](http://www.WINDPOWER.org)

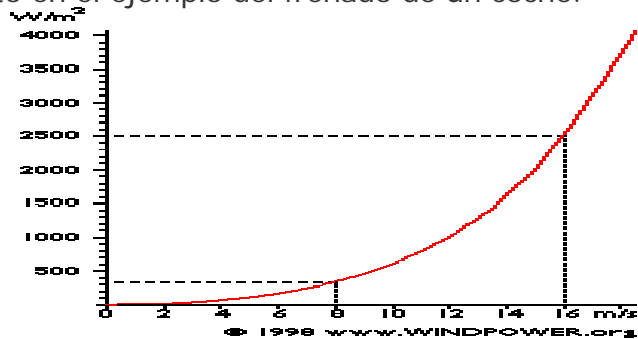
### 1.3.3 Potencia del viento

La velocidad del viento es muy importante para la cantidad de energía que un aerogenerador puede transformar en electricidad: la cantidad de energía que posee el viento varía con el cubo (la tercera potencia) de la velocidad media del viento; p.ej., si la velocidad del

<sup>11</sup> *Ibidem*

viento se duplica la cantidad de energía que contenga será  $2^3 = 2 \times 2 \times 2 =$  ocho veces mayor.

Ahora bien, ¿por qué la energía que contiene el viento varía con la tercera potencia de su velocidad? Seguramente, del saber de cada día, usted estará enterado de que al doblar la velocidad de un coche la energía de frenado para pararlo completamente será cuatro veces mayor (se trata básicamente de la segunda ley de Newton de la cinemática). En el caso de turbinas eólicas usamos la energía de frenado del viento, por lo que si doblamos la velocidad del viento tendremos dos veces más porciones cilíndricas de viento moviéndose a través del rotor cada segundo, y cada una de esas porciones contiene cuatro veces más energía, como se ha visto en el ejemplo del frenado de un coche.



El gráfico muestra que con una velocidad del viento de 8 metros por segundo obtenemos una potencia (cantidad

de energía por segundo) de 314 W por cada metro cuadrado expuesto al viento (viento incidiendo perpendicularmente al área barrida por el rotor).

A 16 m/s obtendremos una potencia ocho veces mayor, esto es,  $2.509 \text{ W / m}^2$ . La tabla de la sección manual de referencia proporciona la potencia por metro cuadrado de superficie expuesta al viento para diferentes velocidades del viento.

### Potencia de la fórmula del viento

La potencia del viento que pasa perpendicularmente a través de un área circular es:  $P = 1/2 \rho v^3 \pi r^2$   
 Donde P = potencia del viento medida en W (vatios).  
 $\rho$  = (rho) = densidad del aire seco = 1.225 medida en  $\text{kg/m}^3$  (kilogramos por metro cúbico, a la presión atmosférica promedio a nivel del mar y a 15° C).  
 v = velocidad del viento medida en m/s (metros por segundo).  $\pi$  = (pi) = 3.1415926535...  
 r = radio (esto es, la mitad de un diámetro) del rotor medido en m (metros).

## 1.4 Recursos eólicos : Vientos globales

### 1.4.1 La fuerza del coriolis

En consecuencia a la rotación de la tierra , cualquier movimiento en el polo norte es desviado hacia la derecha; un ejemplo de esto si miramos desde nuestra

posición en el suelo, el hemisferio sur es desviado hacia la izquierda. Esta fuerza de curvatura es conocida como la fuerza de Coriolis; (debido al matemático francés Gustave Gaspard Coriolis 1792-1843)<sup>12</sup>.

Es difícil de creer el desvío que sufren los movimientos del norte pero lo podemos ver de forma real y tangible como el hecho de que la vías del tren se desgastan mas rápidamente de un lado que del otro; otro ejemplo lo encontramos en los ríos que se encuentran excavadas mas profundamente de una cara que de la otra esto depende directamente de lado del hemisferio que nos encontremos.

El viento en el hemisferio norte tiende a girar al contrario de la manecillas del reloj (visto desde arriba), esto es cuando se acerca a un área de bajas presiones. Todo lo contrario sucede en el hemisferio sur, en el área de las bajas presiones el viento gira a favor de las manecillas del reloj.

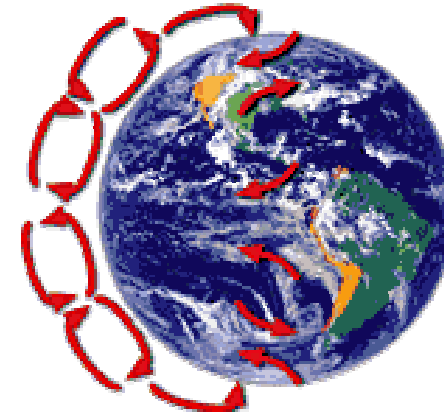
#### 1.4.2 Como afecta la fuerza del coriolis a los vientos globales.

Según las leyes de la física que rigen nuestro planeta y el universo, el viento se desplaza hacia el norte y hacia el sur desde el ecuador en las capas mas altas de la atmósfera. Alrededor de los 30 grados de latitud, la fuerza Coriolis evita que el viento se desplace mas allá. En esa latitud se encuentra un área de altas presiones por lo que el aire empieza a descender de nuevo. Cuando el viento sube desde el ecuador, en el nivel del suelo habrá una área de bajas presiones; esto ocasionará la atracción de os vientos del norte y del sur, esto nos

<sup>12</sup> Vide. [www.windpower.com](http://www.windpower.com)

indica que en el polo habrá bajas presiones debido al frío.

Teniendo en mente la fuerza de curvatura de la fuerza de Coriolis, obtenemos los siguientes resultados generales de las direcciones del viento dominantes<sup>13</sup>:  
Direcciones de viento dominantes



© 1998 [www.WINDPOWER.org](http://www.WINDPOWER.org)

Latitud	90- 60°N	60- 30°N	30- 0°N	0- 30°S	30- 60°S	60- 90°S
Dirección	NE	SO	NE	SE	NO	SE

El espesor de la atmósfera está exagerado en el dibujo de arriba (hecho a partir de una fotografía tomada desde el satélite de la NASA GOES-8). Realmente la atmósfera tiene un espesor de sólo 10 km, lo que representa 1/1200 del diámetro del globo. Esta parte de la atmósfera, conocida con el nombre de troposfera, es

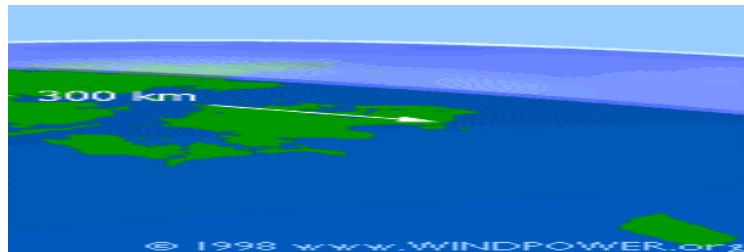
<sup>13</sup> Vide. [www.windpower.com](http://www.windpower.com)

donde ocurren todos los fenómenos meteorológicos (y también el efecto invernadero). Las direcciones dominantes del viento son importantes para el emplazamiento de un aerogenerador, ya que obviamente queremos situarlo en un lugar en el que haya el mínimo número de obstáculos posibles para las direcciones dominantes del viento. Sin embargo la geografía local puede influenciar en los resultados de la tabla anterior.

### 1.4.3 VIENTOS GEOSTROFICOS

Como Todos sabemos la atmosfera es una capa muy fina alrededor del globo; la tierra llamada tambien globo posee un diámetro de 12000 km. La troposfera que se extiende hasta los 11 km. de altitud y en esta tienen lugar todos los fenómenos meteorológicos y el efecto invernadero.

En el dibujo puede verse una extensión de islas de 300 km y la altura aproximada de la troposfera. Visto a una escala diferente: si el globo fuese una bola de 1,2 metros de diámetro, la atmósfera sólo tendría un espesor de 1 mm<sup>14</sup>.



### 1.4.4 VIENTOS DE SUPERFICIE

Los vientos en mucho mas grado se encuentran influenciados por la superficie terrestre o por las altitudes

<sup>14</sup> Vide. [www.windpower.com](http://www.windpower.com)

de hasta 100 mts. Pero obviamente el viento se frena por dos factores: los obstáculos y la rugosidad de la superficie. Por esta razón los vientos de la superficie serán diferentes a los geostroficos, debido a la rotación de la tierra, fuerza coriolis.



### 1.4.5 VIENTOS LOCALES: BRISAS MARINAS

Para la determinación de los vientos dominantes de un área determinada los vientos globales siempre serán de gran importancia; sin embargo las condiciones climáticas locales siempre influyen en las direcciones de los vientos mas comunes. Para este fin los generadores eólicos siempre dependen en su gran mayoría de la combinación o suma de los sistemas locales y globales.

La tierra se calienta en mayor proporción durante el día que el mar por el efecto del sol. El aire sube circula hacia el mar y crea una depresión a nivel del suelo que atrae el aire frío del mar; a esto se le llama brisa marina. Sin embargo al anochecer hay un periodo de calma debido a que las temperaturas se igualan. Normalmente durante la

noche la brisa terrestre tiene velocidades inferiores, debido a que la diferencia de temperaturas entre la tierra y el mar es más pequeña.

“El conocido monzón del sureste asiático es en realidad un forma a gran escala de la brisa marina y la brisa terrestre, variando su dirección según la estación, debido a que la tierra se calienta o enfría más rápidamente que el mar<sup>15</sup>”.



#### 1.4.6 VIENTOS LOCALES: VIENTOS DE LA MONTAÑA

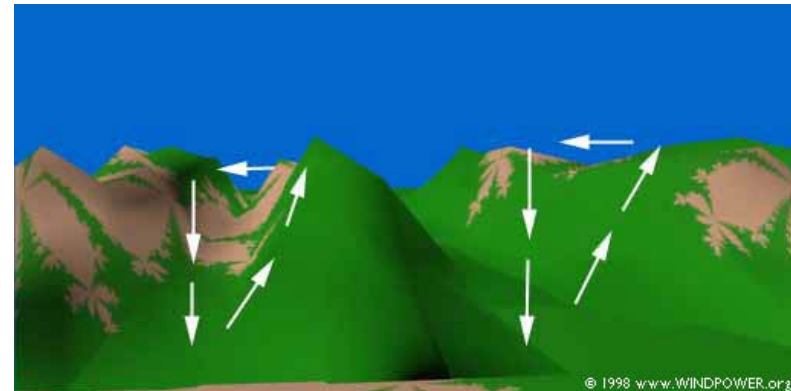
Para entender supongamos un ejemplo, analicemos el viento del valle que se origina en las laderas, que dan al sur o que dan al norte en el hemisferio sur. Cuando la ladera y el viento que se aproxima a ellas esta caliente, la densidad del aire disminuye y el aire asciende hasta la cima, siguiendo la superficie de la ladera; en la noche

<sup>15</sup> Vide . [www.windpower.com](http://www.windpower.com)

sucede lo contrario, la dirección del viento se invierte, yendo ladera hacia abajo, si el valle esta inclinado el aire puede ascender y descender, a esto se le conoce como efecto cañón.

“Los vientos que soplan en las laderas a sotavento pueden ser bastante potentes. Ejemplo de ello son: El Fhon de los Alpes en Europa, el Chinook en las Montañas Rocosas y el Zonda en los Andes.

Ejemplos de otros sistemas de viento locales son el Mistral, soplando a lo largo del valle del Rhone hasta el Mar Mediterráneo, y el Sirocco, un viento del sur proveniente del Sahara que sopla hacia el Mar Mediterráneo<sup>16</sup>”.



## II. POTENCIAL EÓLICO EN LA REPUBLICA MEXICANA

### 2.1 REGIONES EOLOENERGÉTICAS DE MEXICO

<sup>16</sup> Vide [www.windpower.com](http://www.windpower.com)



México cuenta con enormes posibilidades para desarrollar esta fuente de energía alternativa que, además, se traduciría en una importante fuente de empleo. El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) inició en 1977 el análisis de la información meteorológica para determinar el potencial eólico nacional. El conocimiento del recurso energético eólico está a nivel exploratorio, sin embargo, las mediciones han servido para confirmar la existencia de vientos aprovechables en las siguientes regiones:

- \* Sur del Istmo de Tehuantepec.
- \* Península de Baja California.
- \* Península de Yucatán.
- \* Altiplano norte.
- \* Región Central.
- \* Las costas del país.



[www.inegi.com.mx](http://www.inegi.com.mx)

**Sur del Istmo de Tehuantepec:** Sur del Istmo de Tehuantepec. Esta región contiene un área de mil km. cuadrados expuesta a vientos muy intensos. En las inmediaciones del poblado de La Venta, Oaxaca, se instaló en 1994 la primera minicentral de generación de energía eólica. La Venta presenta un desempeño muy superior al que tendría una instalación semejante en la propia Dinamarca. No obstante, el proyecto no se ha ampliado y queda como una muestra del potencial energético de la región.

**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 eolicamente 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.

Es una región importante debido a su extensión geográfica y su baja densidad de población. El poblado de La Rumorosa y zonas aledañas, así como el paso entre la Sierra de Juárez y la Sierra de San Pedro Mártir, son lugares en los que se ha identificado un alto potencial eólico.

**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.

Cabo Catoche, la costa de Quinta Roo y el Oriente de Cozumel son zonas con un potencial eólico interesante, particularmente para contribuir a los requerimientos de generación de energía eléctrica para la península.

**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,

Desde la región central de Zacatecas hasta la frontera con los Estados Unidos, el Norte del país tiene sitios con un importante potencial de este tipo de energía.

**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.

La compleja orografía 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. El extenso litoral mexicano y sus islas, presenta por lo menos condiciones para generación eléctrica en pequeña escala y almacenamiento en baterías, sistemas híbridos diesel-eólicos y en otros generación interconectada. La 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 próximo 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 125,000 MW instalados, en esas condiciones, la energía eólica podrá contribuir con la generación eléctrica de el orden de 30,000 MW instalados de aerogeneradores, un gran porcentaje de ellos produciendo hidrógeno para centrales turbogas.



[www.inegi.com.mx](http://www.inegi.com.mx)

## 2.2 POTENCIAL DE APLICACIÓN EN MÉXICO

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. 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 permear 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, modificando leyes y reglamentos, e incluso estableciendo 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 a la difusión masiva de tecnologías de generación eléctrica a partir de energías renovables. Si al inicio de próxima década, México arrancara un enérgico programa de desarrollo de centrales eoloelectricas, podría alcanzarse la cifra de 5000 MW para el 2010, aun 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, el desarrollo de centrales eoloelectricas es lo que más empleos produce dentro del sector energético, beneficiando también a las comunidades donde se asientan, ya que la utilización del suelo interfiere marginalmente con los usos agrícolas o de pastoreo, permitiendo la continuidad de estas actividades y recibiendo una renta adicional por el arrendamiento de los espacios y derechos de vía para localizar aerogeneradores, tender líneas de interconexión y subestaciones eléctricas.

En la actualidad se consumen 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 10,000 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 250,000 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.

El sector eléctrico tiene 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.

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 solo 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 5,000 MW eoloeléctricos al 2010 se considera una meta viable y necesaria.

Si consideramos que para el año 2010, más del 50% de la capacidad instalada seguirá siendo de 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.

La instalación de 5,000 MW eoloeléctricos al año 2010, instalando a razón de 500 MW por año, implicaría para el 2011 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 desplazamiento de gas natural únicamente.

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 e intermitente, si 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 5000 MW eólicos al año 2010, no terminaría ahí, sino que sentaría las bases para continuar con un mayor énfasis, considerando que el tope de capacidad instalada eoloeléctrica, a mediados del próximo siglo, será del orden de la capacidad total instalada a la fecha en el Sistema Eléctrico Nacional, es decir, alrededor de 30,000 MW.

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. Solo 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 10% de la capacidad instalada del Sistema Eléctrico Nacional. Lograr esta penetración para el año 2010, 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 500 MW por año, desde el 2002. Esto implica que, de 1998 al 2001, se tomen todas las provisiones legales, reglamentarias, fiscales, financieras, normativas, tarifarias, ambientales, operacionales, institucionales, y fundamentalmente estratégicas y de planeación, para que esto pueda ser posible.

## 2.3 MEDICIÓN DEL RECURSO

“Las mediciones de las velocidades del viento, se hacen utilizando normalmente un anemómetro de calzoletas. Este tiene un eje vertical y tres calzoletas que capturan el viento, el número de revoluciones por minuto (vueltas) son registradas electrónicamente. Normalmente los anemómetros cuentan con una veleta para identificar la dirección del viento. Otros tipos de anemómetros incluyen ultrasonidos o anemómetros provistos de láser que detectan el desfase del sonido o la luz coherente reflejada por las moléculas de aire. La ventaja de los anemómetros no mecánicos es que son menos sensibles a la formación de hielo. Sin embargo en la práctica los anemómetros de calzoletas son ampliamente utilizados, y modelos especiales con ejes y calzoletas eléctricamente calentados pueden ser usados en las zonas árticas.

Los anemómetros de hilo electro calentado detectan la velocidad del viento mediante pequeñas diferencias de temperatura entre los cables situados en el viento y en la sombra del viento (cara a sotavento).

Existen herramientas (anemómetros) y procedimientos para medir con relativa precisión los vientos, los cuales con ayuda de sensores de velocidad y dirección se llevan en registros en tabletas electrónicas de almacenamiento de datos, los cuales se procesan con ayuda de una computadora. Por este medio se puede obtener:

El patrón diario de velocidad, que muestra si el viento obedece a gradientes locales de temperatura del ciclo día-noche o a procesos termodinámicos de mas baja

frecuencia como el movimiento de las masas continentales y oceánicas.

El histograma mensual de velocidad que al asociar tiempos de duración acumulados a las velocidades observadas describe la forma como se disipa la energía a través del viento, dentro de un sistema climático-geográfico definido. La uniformidad en el contenido energético del viento ha permitido emplear con éxito la función de Distribución de Weibull aunque también es aplicable la distribución de Rayleigh.

Estas mediciones se deberán llevar a cabo por periodos relativamente largos (hasta dos años) si el proyecto es de una magnitud grande de capital, o con simples exploraciones o mediciones a mano cuando el sistema a instalar sea pequeño.

Para proyectos de más de 5 kW, vale la pena llevar a cabo mediciones aunque sea por periodos muy cortos (4-6 meses), pero para más de 20 kW es recomendable medir al menos un año. Entre los parámetros que son necesarios conocer están: Velocidad, dirección, temperatura ambiente, humedad y presión atmosférica.

La cuantificación del potencial energético de un lugar dado se indica en términos de energía disponible, la cual puede ser traducida a valores de velocidad media con sus respectivas reservas. El término más adecuado es el que se da en kW/m<sup>2</sup> como un dato de densidad de potencia, o kWh/m<sup>2</sup> como un dato de densidad de energía.

La altura recomendada para llevar a cabo estas mediciones es a 20 m como mínimo, algunos autores recomiendan 10 m, sin embargo la experiencia nos dice que a esta altura existen un sinnúmero de factores que alteran los valores reales por lo que resultan o insuficientes o sumamente imprecisos los datos obtenidos. Cuando ya se tiene un proyecto en mente, lo mejor es medir a la altura a la que se instalaría el generador eólico<sup>17</sup>.

### III. EL VIENTO EN EL VALLE DE MÉXICO

#### 3.1 ASPECTOS GEOGRAFICOS DEL DISTRITO FEDERAL

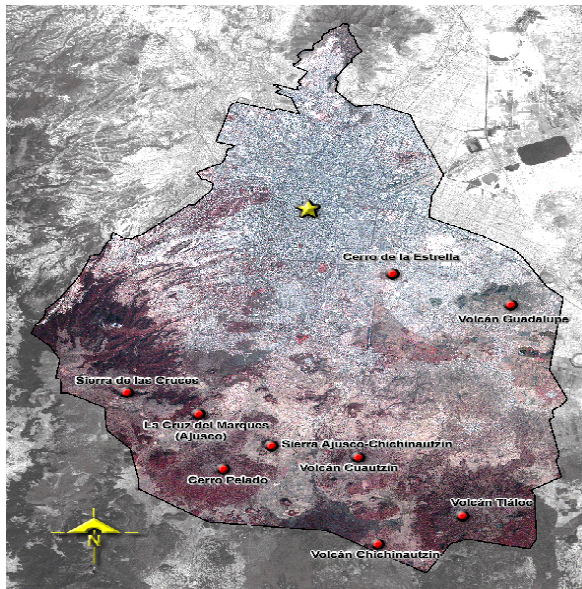
##### 3.1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

Coordenadas geográficas extremas	Al norte 19°36', al sur 19°03' de latitud norte; al este 98°57', al oeste 99°22' de longitud oeste. (a)
Porcentaje territorial	El Distrito Federal representa el 0.1% de la superficie del país. (b)
Colindancias	El Distrito Federal colinda al norte, este y oeste con el estado de México y al sur con el estado de Morelos. (a)
Capital	Ciudad de México
FUENTE: (a) <b>INEGI</b> . Marco Geoestadístico, 2000. (b) <b>INEGI-DGG</b> . Superficie de la República Mexicana por Estados. 1999.	

<sup>17</sup> [www.windpower.org](http://www.windpower.org)

Espaciomapa está hecho a partir de imágenes Landsat TM (mapeador temático) tomadas en el año de 1993 con una combinación de falso color normal que permite distinguir:

- En tonos rojo, la vegetación cuando es verde.
- En color azul tenue, las grandes localidades urbanas.
- En color negro, las presas y lagos cuando son profundos y transparentes, cuando no lo son, aparecen en tonos de azul.
- En tonos rosa, las áreas de cultivo de riego en lugares planos.
- En tonos blancos, áreas de cultivo de temporal.



www.inegi.com.mx

### 3.1.2 ELEVACIONES PRINCIPALES

#### ELEVACIONES PRINCIPALES

Nombre	Latitud Norte		Longitud Oeste		Altitud
	Grados	Minutos	Grados	Minutos	msnm
Cerro La Cruz del Marqués (Ajusco)	19	12	99	16	3,930
Volcán Tlaloc	19	06	99	02	3,690
Cerro Pelado	19	09	99	13	3,620
Volcán Cuautzin	19	09	99	06	3,510
Volcán Chichinautzin	19	05	99	08	3,490
Volcán Guadalupe (El Borrego)	19	20	99	00	2,820
Cerro del Chiquihuite	19	32	99	08	2,730
Volcán Teuhtli	19	13	99	02	2,710
Cerro de la Estrella	19	21	99	05	2,450
Cerro de Chapultepec	19	25	99	11	2,280

msnm: metros sobre el nivel del mar.  
 FUENTE: INEGI. Carta Topográfica, 1:50 000.

### 3.1.3 FISIOGRAFIA

Provincia	Subprovincia	Sistema de Topoformas	% de la superficie estatal
Eje Neovolcánico	Lagos Volcanes y de Anáhuac	Sierra volcánica con estrato volcanes	41.80
		Sierra volcánica de laderas escarpadas	9.93
		Sierra escudo volcán	1.33
		Lomerío	0.39
		Lomerío con cañadas	7.72
		Meseta basáltica malpaís	9.43
		Llanura aluvial	5.21
		Llanura lacustre	20.35
		Llanura lacustre salina	3.84

FUENTE: **INEGI**. Atlas Cartográfico de la Ciudad de México y área conurbada

### 3.1.4 GEOLOGÍA

Era	Periodo	Roca o suelo	% de la superficie estatal
Cenozoico	Cuaternario	Ignea extrusiva	44.72
		Suelo	31.62
	Terciario	Ignea extrusiva	23.66

FUENTE: **INEGI**. Carta Geológica, 1:1 000 000.



www.inegi.com.mx



La roca ígnea extrusiva, cubre más de las tres quintas partes de la superficie del Distrito Federal. Estos afloramientos corresponden a dos periodos diferentes de la Era del *Cenozoico* (63 millones de años aproximadamente); el más reciente es el Periodo Cuaternario, con afloramientos rocosos ígneos extrusivos (44.7%) y **suelo** (31.6%), ubicados el primero, de la parte central hacia el sur y el segundo, en la zona norte. El Periodo Terciario se caracteriza por los afloramientos de rocas **ígneas extrusivas**, cubren una superficie de 23.7%, sus principales unidades litológicas se localizan al oeste y este del territorio Distrital.

### 3.1.5 DIVISIÓN DELEGACIONAL

Clave	Delegación
002	Azcapotzalco
003	Coyoacán
004	Cuajimalpa de Morelos
005	Gustavo A. Madero
006	Iztacalco
007	Iztapalapa
008	Magdalena Contreras, La
009	Milpa Alta
010	Alvaro Obregón
011	Tláhuac
012	Tlalpan

013	Xochimilco
014	Benito Juárez
015	Cuauhtémoc
016	Miguel Hidalgo
017	Venustiano Carranza
FUENTE: <b>INEGI</b> . Distrito Federal.XII Censo General de Población y Vivienda. Resultados Preliminares.	

En 1990 la población de la entidad ascendía a 8'235,744 habitantes distribuidos en 16 delegaciones, el 33.5% de la población se encontraba en las delegaciones de Iztapalapa y Gustavo A. Madero.

Con base en los resultados preliminares del Censo General de Población y Vivienda del 2000, la entidad tiene una población de 8'591,309 habitantes distribuidos en 16 delegaciones; el 34.97% de ellos se encuentra en las delegaciones de Iztapalapa y Gustavo A. Madero.

### 3.1.6 CLIMAS

El Distrito Federal se encuentra en la zona intertropical, en la que por latitud la temperatura es alta, sin embargo, esa condición es modificada por la altitud y el relieve, de esta manera, 57% del territorio de esa entidad presenta clima *templado*, 33% climas *semifríos* y 10% clima *semiseco*.

Del norte hacia el noroeste, centro, centrosur y este, se distribuye el clima **templado subhúmedo con lluvias en verano**. Esta extensa zona tiene una altitud que va de 2 250 m en Iztapalapa a 2 900 m en la Sierra de

Guadalupe, en las laderas orientales de la Sierra de las Cruces y en las laderas boreales de la Sierra Ajusco-Chichinautzin; en ella, la temperatura media anual varía de 12°C en las partes más altas a 18°C en las de menor altitud, en ese mismo orden, la precipitación total anual va de 1 000 a 600 mm y el periodo en que se concentra la lluvia es el verano.

Tipo o subtipo	% de la superficie estatal
Templado subhúmedo con lluvias en verano	57.00
Semifrío húmedo con abundantes lluvias en verano	10.00
Semifrío subhúmedo con lluvias en verano	23.00
Semiseco Templado	10.00

FUENTE: INEGI. Carta de Climas, 1:1 000 000.



www.inegi.com.mx

El clima **semifrío subhúmedo con lluvias en verano** se localiza bordeando por el sur la zona antes descrita. Se muestra como una franja orientada noroeste-sureste y comprende los terrenos de mayor altitud (de 2 900 m hacia arriba) en las sierras De las Cruces y Ajusco-Chichinautzin. Su temperatura media anual llega a 12°C en las partes más bajas de la zona y a 5°C en las cimas de las sierras; la precipitación total anual va de 1 000 a 1 500 mm.

En los terrenos cercanos a los límites suroeste y sur del Distrito Federal se presenta el clima **semifrío húmedo con abundantes lluvias en verano**. Este cubre 10% de la superficie de la entidad en las vertientes occidental y sur de los cerros La Cruz del Marqués (Ajusco) y Pelado, y el Volcán Chichinautzin. La temperatura media anual varía dentro del mismo rango del clima semifrío subhúmedo, pero la precipitación total anual es un poco mayor; pues va de 1 200 a más de 1,500 mm.

La zona menos húmeda está situada en los alrededores del aeropuerto internacional de la Ciudad de México y hacia el norte del mismo aeropuerto; pertenece al clima **semiseco templado con lluvias en verano**, que tiene como características distintivas en estos lugares un rango de temperatura media anual de 14° a 18°C y una precipitación total anual de 500 a 600 mm.

### 3.1.7 ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Clave	Estación	Latitud Norte			Longitud Oeste			msnm
		Grados	Minutos	Segundos	Grados	Minutos	Segundos	
09-049	Tacubaya	19	24	00	99	12	00	2,380

09-065	Ajusco	19	13	00	99	12	00	2		Moctezuma		
09-005	Gran Canal	19	29	00	99	05	00	2	Beceña	R. Moctezuma	Canal General	R. Moctezuma
										R. Moctezuma	Canal Nacional	R. Moctezuma
										R. Moctezuma	Canal Cuemanco	R. Moctezuma
										R. Moctezuma	Canal Desagüe del	R. Moctezuma
										R. Moctezuma		

FUENTE: **INEGI**. Carta Hidrológica de Aguas Superficiales, 1:2500 000.  
**INEGI**. Carta Topográfica 1:50 000.

### 3.1.8 REGIONES Y CUENCAS HIDROLÓGICAS

Región	Cuenca	% de la superficie estatal
Lerma-Santiago	R. Lerma-Toluca	0.50
Balsas	R. Balsas-Mezcala	4.60
Pánuco	R. Moctezuma	94.90

FUENTE: **INEGI**. Carta Hidrológica de Aguas Superficiales, 1:250 000.

	Ubicación	Nombre	Ubicación
Mixcoac (entubado)	R. Moctezuma	Agua de Lobo	R. Balsas-Mezcala
Churubusco (entubado)	R. Moctezuma	El Zorrillo	R. Balsas-Mezcala
Los Remedios	R. Moctezuma	Oxaixtla	R. Moctezuma
La Piedad (entubado)	R. Moctezuma	Canal Chalco	R. Moctezuma
Tacubaya	R. Moctezuma	Canal Apatlaco	R. Moctezuma

La Región Hidrológica denominada Pánuco, es la que ocupa la mayor parte del territorio del Distrito Federal (94.9%), incluye sólo la Cuenca *R. Moctezuma*, y abarca toda el área de la Ciudad de México. En esta cuenca se localizan ríos tales como Los Remedios, Tacubaya, Mixcoac, Churubusco, Consulado, etc., estando los tres últimos entubados, así como los canales Chalco, Apatlaco y Cuemanco, entre otros; además, se encuentra el lago Xochimilco y los lagos artificiales de San Juan de Aragón y Chapultepec; cabe señalar que todas las corrientes y cuerpos de agua mencionados están inmersos en la mancha urbana. Por otra parte, porciones de la Región Hidrológica del Balsas, se presentan al sur y suroeste del Distrito Federal, que incluye sólo la Cuenca *R. Balsas-Mezcala*, aquí se encuentran los ríos Agua de Lobo y El Zorrillo. La Región Hidrológica Lerma-Santiago, se presenta únicamente en dos pequeñas zonas al oeste del

Distrito Federal, las cuales pertenecen a la Cuenca *R. Lerma-Toluca*, estando ausentes corrientes y cuerpos de agua importantes.

### 3.1.9 CUERPOS DE AGUA

Nombre	Ubicación
Presa Anzaldo	R. Moctezuma
Presa Canutillo	R. Moctezuma
Lago San Juan de Aragón (artificial)	R. Moctezuma
Lagos de Chapultepec (artificiales)	R. Moctezuma
Lagos de Xochimilco	R. Moctezuma
FUENTE: INEGI. Carta Hidrológica de Aguas Superficiales, 1:250 000. INEGI. Carta Topográfica, 1:50 000 (segunda edición).	

### 3.1.10 AGRICULTURA Y VEGETACIÓN

**AGRICULTURA Y VEGETACIÓN.** Aproximadamente 62% del territorio que comprende el Distrito Federal está ocupado por la zona urbana, la porción restante presenta vegetación de **Bosque, Pastizal** y en buena proporción se dedica a la **Agricultura**.

Los bosques de coníferas y encinos son los tipos de vegetación que comúnmente cubren las sierras volcánicas que flanquean desde el oeste y hasta el sur, al valle de México; en estos lugares predominan los climas templados subhúmedos, existen suelos de origen ígneo, ricos en materia orgánica y de profundidad variable que por lo general sustentan masas arboladas de pinos mezcladas con encinos; en varios lugares los bosques

están conformados por poblaciones casi puras de pinos y en otros, generalmente a menores altitudes, la dominancia es del encino. Algunas especies frecuentes en estos lugares son: *Pinus oocarpa*, *P. michoacana*, *P. leiophylla*, *Quercus magnoliifolia* y *Q. laurina*, entre otras. En algunos sitios donde la sierra presenta rangos altitudinales significativos (superiores a 2 400 msnm), sobre todo en laderas y cañadas húmedas protegidas de la intensa radiación solar y de los fuertes vientos, se desarrollan bosques de oyamel muy característicos y de singular belleza, conformados por *Abies religiosa* (oyamel), los cuales son árboles altos cuya forma triangular se ramifica desde cerca de su base para terminar en punta en el ápice. Casi la totalidad de los bosques de estas regiones presentan diversos grados de disturbio y gran parte de la superficie original es ahora zona urbana. La alta densidad demográfica ejerce una fuerte presión sobre estos recursos, principalmente para la extracción de madera, abrir espacios a la urbanización, agricultura o bien inducir pastizales, los cuales soportan la actividad del ganado bovino y ovino.

Como consecuencia de los desmontes realizados en las zonas boscosas aparece el pastizal inducido, el cual se mantiene a través del pastoreo continuo de ganado y de quemas frecuentes, las cuales estimulan su crecimiento en el periodo de lluvias. Algunos elementos representativos son *Bouteloua* spp. (navajita), *Aristida* sp. (zacate), *Muhlenbergia* spp. (zacatón). En algunos lugares al sur del valle de México se desarrolla el pastizal halófilo; en suelos que poseen alto contenido de sales, se presentan preferentemente en los fondos de las cuencas cerradas, sujetas a inundaciones periódicas, algunas especies típicas de este tipo de vegetación son *Distichlis*

sp. (saladillo), *Muhlenbergia* spp. (zacatón) y *Atriplex* spp. (zacate), entre otras.

Las zonas agrícolas se localizan hacia la parte sur y sureste del Distrito Federal, en terrenos apropiados para llevar a cabo estas actividades, la mayor parte de ellos sustentan agricultura de temporal, pero existen también zonas beneficiadas con el riego; se produce principalmente maíz, frijol, chile, avena, haba y nopal. Las hortalizas y floricultura son importantes en la zona de Xochimilco.

El Distrito Federal tiene pocas posibilidades de llevar a cabo las actividades agrícolas por lo extenso de sus asentamientos humanos; pero en cinco de las delegaciones se presentan las aptitudes para poder realizarlas. Para el caso de la agricultura **Mecanizada continua**, la factibilidad se localiza en las delegaciones de Tláhuac, Xochimilco, Tlalpan y Milpa Alta; mientras que para la de **Tracción animal continua**, se distribuye en las delegaciones de Milpa Alta, Xochimilco, Tlalpan y Cuajimalpa de Morelos. Para la agricultura de **Tracción animal estacional**, se ubica su mayor posibilidad en las delegaciones colindantes con el estado de Morelos. Por último, se estima que más de la mitad del territorio del Distrito federal son terrenos **No aptos** para la agricultura.

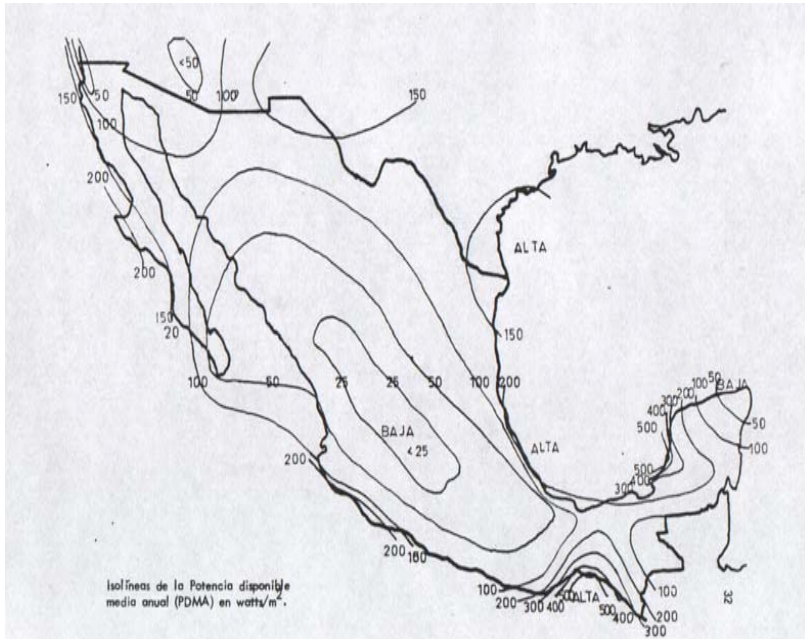
#### IV. VIENTOS DOMINANTES EN LA CIUDAD DE MÉXICO

##### 4.1 Vientos dominantes en la ciudad de México

En este capítulo tengo el propósito de mostrar las condiciones meteorológicas con respecto al viento que se presentan en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) durante el año 2004, a través de la descripción

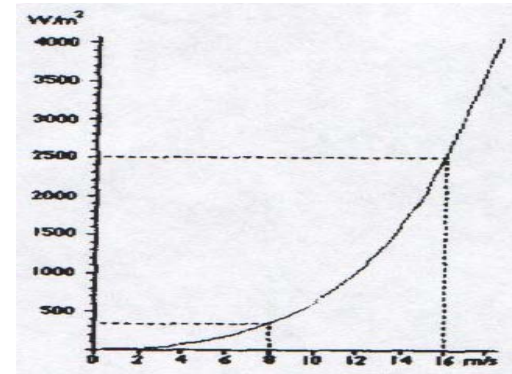
de esta variable meteorológica medidas por el Sistema de Monitoreo Atmosférico del Gobierno del Distrito Federal, de información proporcionada por la Gerencia del Servicio Meteorológico Nacional y la Fuerza Aérea Mexicana. Al respecto, la primera institución suministra datos de superficie para el Valle de México. La segunda, proporciona datos de radiosondeo atmosférico de todo el país, con los cuales se identifican los sistemas meteorológicos que afectan al Valle en todo momento: se calcula la capa de mezclado y se detectan las inversiones térmicas con todos sus parámetros. Los datos que se registran son tomados de el reporte meteorológico de la Secretaría de Medio Ambiente del D.F. La metodología empleada en la elaboración de este informe abarcó un análisis estadístico de los datos de temperatura ambiente y humedad relativa; un análisis vectorial de los datos de dirección y velocidad del viento, registrados por el SIMAT, y de visibilidad registrados por la Fuerza Aérea Mexicana (FAM). El campo de viento se elaboró a partir de promedios vectoriales de dirección y velocidad donde las líneas de flujo definen convergencias y vórtices de viento que sirven para analizar el transporte de los contaminantes. Las inversiones térmicas y la capa de mezclado se identificaron a través del gradiente o perfil vertical de temperatura ambiente que se obtiene del sondeo atmosférico de la Ciudad de México, realizado por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

Primeramente podemos ver en el plano siguiente la potencia disponible media anual en la república mexicana medida en  $W/m^2$  datos obtenidos por el atlas de del viento de Latinoamérica.



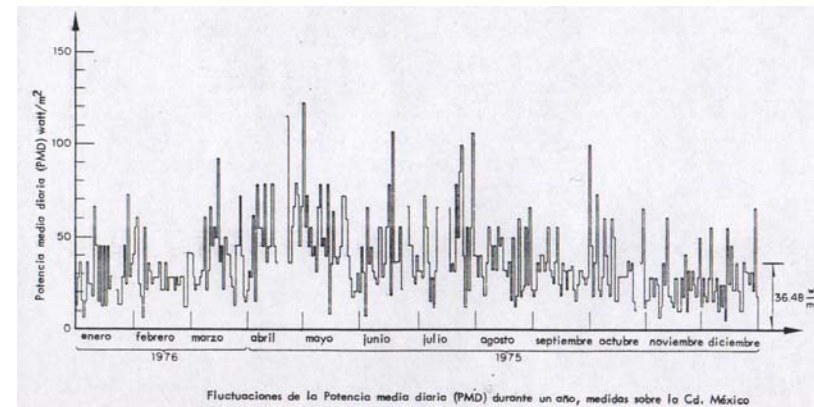
Tesis profesional Jorge Sanchez Sesma

Se puede ver que en la zona central donde se encuentra el DF. existe un rango de potencia media anual de 50 W/m<sup>2</sup>, lo que equivaldría a tener una velocidad del viento en promedio de 3 m/seg aproximadamente 11 km/h, durante todo el año, lo cual quiere decir que podrían sin problema hacer girar los rotores de los aerogeneradores y producir electricidad. Esto se puede ver en la grafica siguiente donde podemos ver que los grandes aerogeneradores empiezan a girar a una velocidad de 3 a 5 m/s (generadores de mas de 30 mts. de diámetro; rotor) donde el rango ideal de velocidad seria de 10 a 12 m/s. para producir electricidad en forma optima. Sin embargo son grande maquinas que se colocan en zonas privilegiadas.

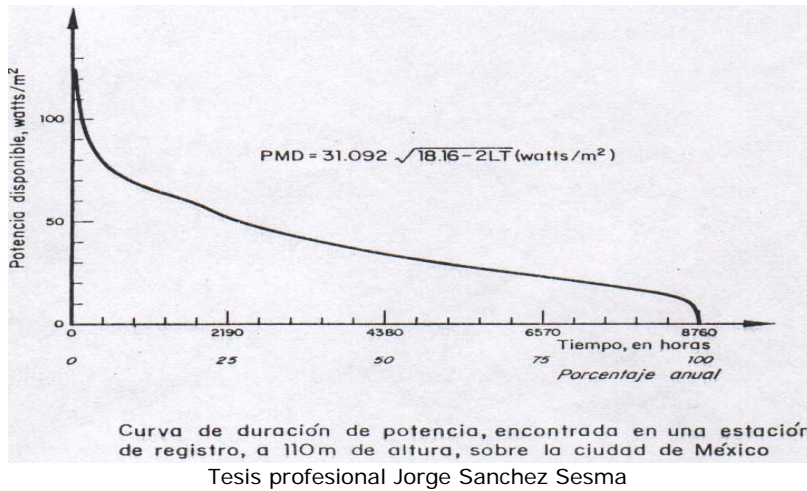


Tesis profesional Jorge Sanchez Sesma

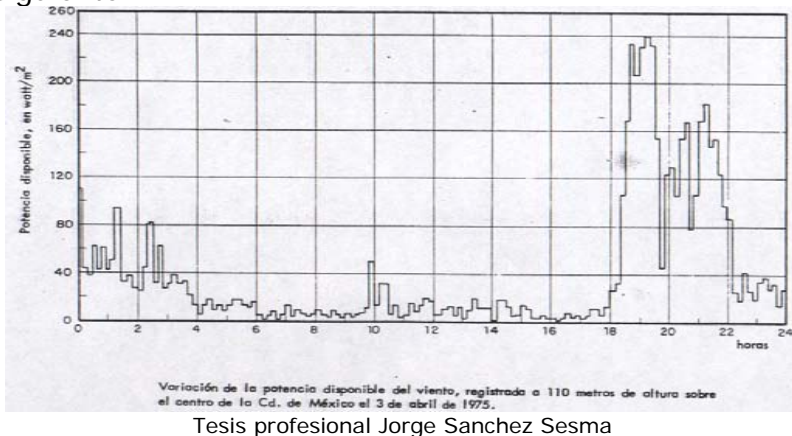
Algunos estudios previos de las condiciones del viento en el DF. en décadas pasadas nos indican que la potencia media diaria del viento se puede manejar en rangos de 31 a 36 w/m<sup>2</sup> como se puede ver en las figuras siguientes.



Tesis profesional Jorge Sanchez Sesma



Aunque en algunos casos la variación de la potencia en un estudio realizado a 110 metros de altura sobre la ciudad de México da algunos rangos muy altos de potencia del viento como se puede ver en la figura siguiente.



#### 4.1.1 El viento en el valle de México

El Distrito Federal limita al Norte, Oeste y Este con el Estado de México y al Sur con el Estado de Morelos Junto con 18 municipios conurbados del Estado de México conforma la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), considerada la zona urbana más grande del país que alberga una población de más de 18 millones de habitantes. La ZMVM forma parte de la Cuenca del Valle de México que se ubica en la región central del territorio nacional a una elevación promedio de 2,240 metros sobre el nivel del mar (msnm) y se localiza en los 19° 20' de Latitud Norte y a los 99° 05' de Longitud Oeste, abarcando una superficie de 9,560 km<sup>2</sup>. El relieve de la cuenca está conformado por una planicie alterada por pequeñas elevaciones:

al Norte por la Sierra de Guadalupe y el Cerro del Chiquihuite; al centro por el Cerro de la Estrella; al Este por el Cerro de San Nicolás y la Sierra volcánica de Santa Catarina; al Sur y Suroeste el terreno se eleva a más de 3,600 msnm, en la región conocida como la sierra del Ajusco, que separa a la ZMVM del Valle de Cuernavaca; y al Oeste, la Sierra de las Cruces la separa del Valle de Toluca.

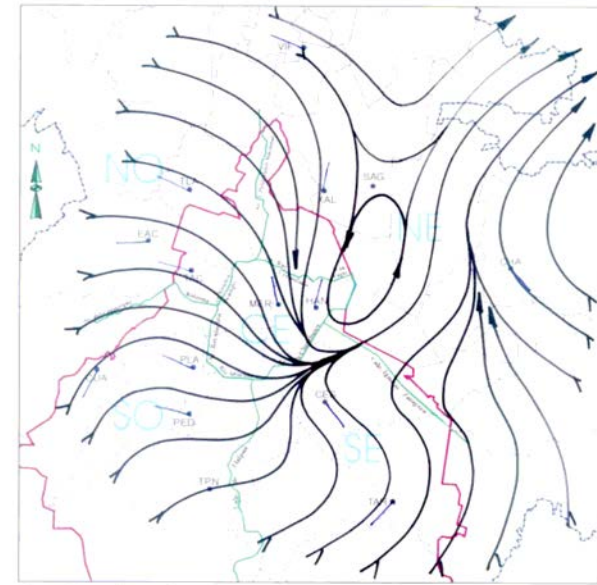


[www.igeograf.unam.mx](http://www.igeograf.unam.mx)

### **Ubicación geográfica de la Zona Metropolitana del Valle de México.**

En lo que se refiere a una descripción de los campos de viento promedio para la ZMVM en el año 2004. Las líneas de flujo consideran las componentes de la dirección y la velocidad del viento al nivel de superficie de las estaciones remotas del Sistema de Monitoreo Atmosférico que cuentan con torre meteorológica. El Valle de México cuenta con una entrada principal de aire libre de obstáculos en la zona Noreste, región donde el terreno es plano, y otra entrada en la región oriental. La dirección predominante de los vientos en la ZMVM es del Noreste; sin embargo, los rasgos orográficos del Valle, dan lugar a la formación de líneas de confluencia y zonas de convergencia del viento.

Con la idea de ilustrar lo mencionado en el párrafo anterior, en la figura siguiente se exhibe el flujo de viento promedio anual a las 03:00 horas. Se observa un flujo predominante del Suroeste y una línea de convergencia hacia el Noreste de la ZMVM. Este comportamiento es debido al viento catabático provocado por las montañas del Suroeste, el cual es más conocido como "brisa de montaña". Este tipo de viento se ubica dentro de los identificados como vientos locales, ya que su alcance se limita a áreas pequeñas, meteorológicamente hablando, como por ejemplo, el Valle de México.

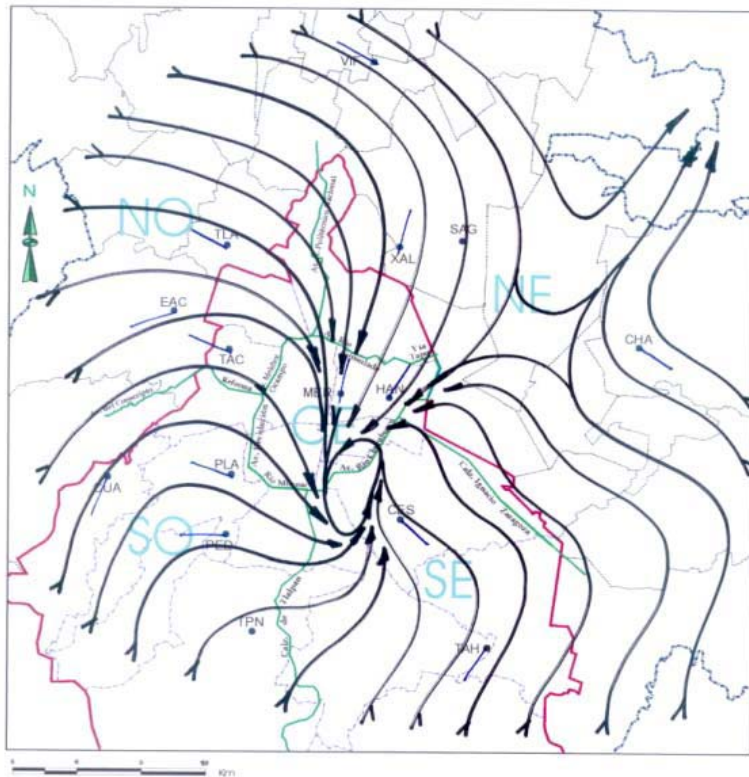


Informe climatológico ambiental 2004 D.F.

### **Líneas de Flujo de viento promedio anual en el Valle de México a las 03:00 horas.**

La Figura siguiente ilustra el flujo de viento promedio anual a las 06:00 horas donde se distingue la formación de un vórtice ciclónico en el Centro de la ZMVM. Esta estructura del campo de viento es un indicador de cómo se pueden formar remolinos dentro del Valle a cualquier hora del día. Si estos se forman en días con estabilidad atmosférica, viento débil y mucha insolación, juegan un papel muy importante en la presencia de altas concentraciones de ozono debido a que mantienen recirculando la contaminación en el lugar donde se forman.



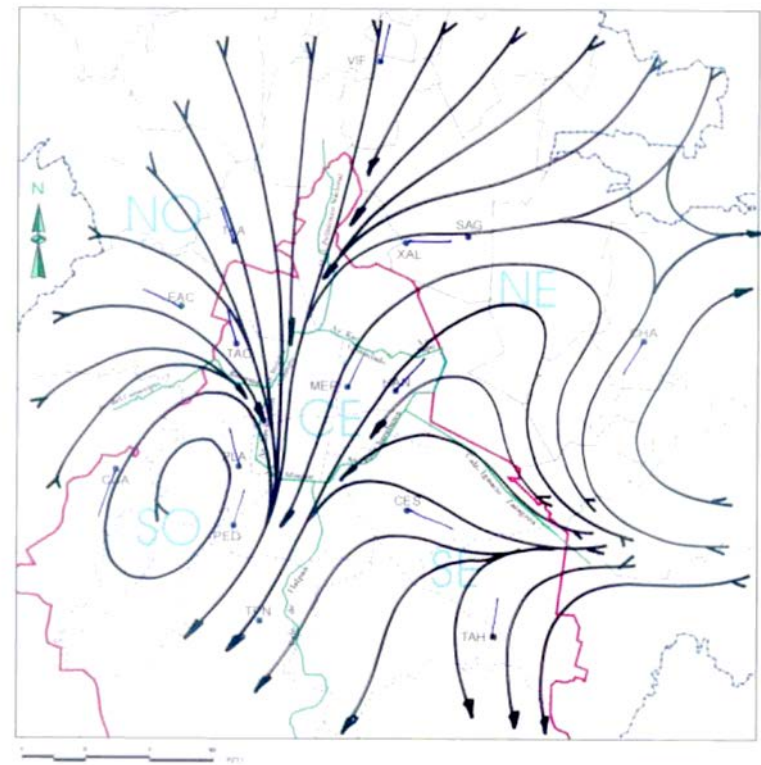


**Líneas de Flujo de viento promedio anual en el Valle de México a las 06:00 horas<sup>18</sup>.**

La Figura siguiente muestra el flujo de viento promedio anual a las 09:00 horas. En este mapa se distingue la persistencia de un vórtice anticiclónico en el Suroeste, una línea de convergencia, extendida de Norte a Sur, formada por la entrada principal del viento de

<sup>18</sup> Informe climatológico ambiental 2004 D.F.

componente Norte y un flujo proveniente de la región Sureste del Valle de México.

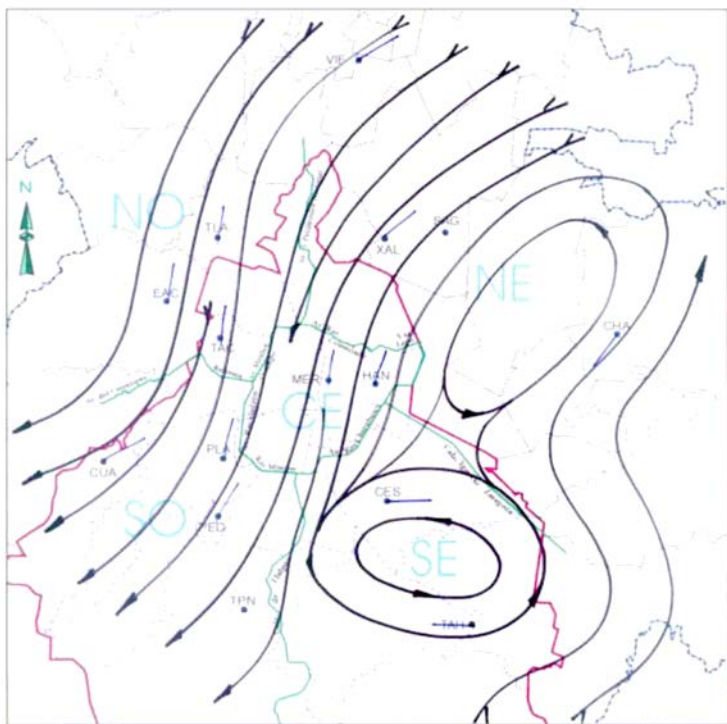


**Líneas de Flujo de viento promedio anual en el Valle de México a las 09:00 horas<sup>19</sup>.**

La Figura siguiente indica que el flujo de viento promedio anual a las 12:00 horas formó un vórtice ciclónico (viento con giro contrario a las manecillas del reloj) con dos

<sup>19</sup> idem

núcleos, uno sobre la zona Sureste y otro en la zona Noreste. Aparejado a esos remolinos, se distingue un flujo predominante de Noreste a Suroeste dentro de la ZMVM.

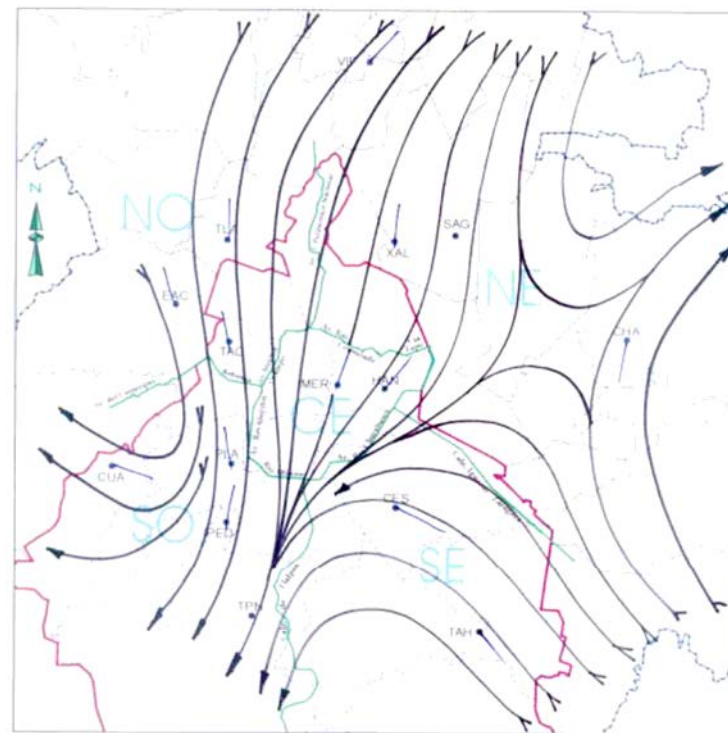


**Líneas de Flujo de viento promedio anual en el Valle de México a las 12:00 horas<sup>20</sup>.**

La Figura siguiente ilustra el flujo de viento promedio anual a las 15:00 horas donde se observa la evolución

<sup>20</sup> idem

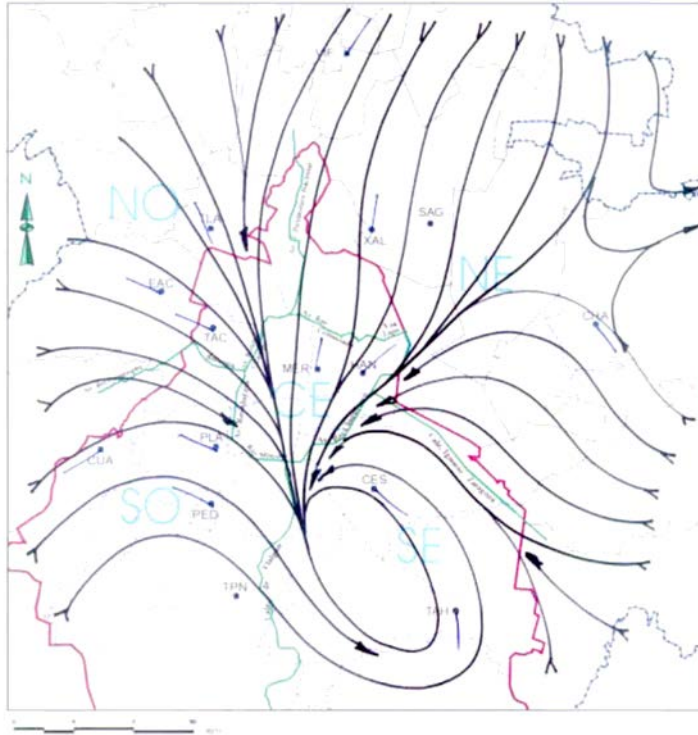
del flujo predominante, siendo de Norte a Sur, interactuando con una línea de convergencia en el Sur. Este comportamiento anual explica el arrastre de contaminantes primarios hacia el Sur y Suroeste de la ZMVM donde reaccionan, a partir del medio día, para producir altos niveles de ozono, que con cierta frecuencia se presentan en estas regiones.



**Líneas de Flujo de viento promedio anual en el Valle de México a las 15:00 horas<sup>21</sup>.**

<sup>21</sup> idem

La Figura siguiente, correspondiente al flujo de viento promedio anual a las 18:00 horas, resalta dos líneas de convergencia de Norte a Sur y de Noreste a Suroeste, respectivamente, que desembocan en una circulación ciclónica localizada en el Sureste.

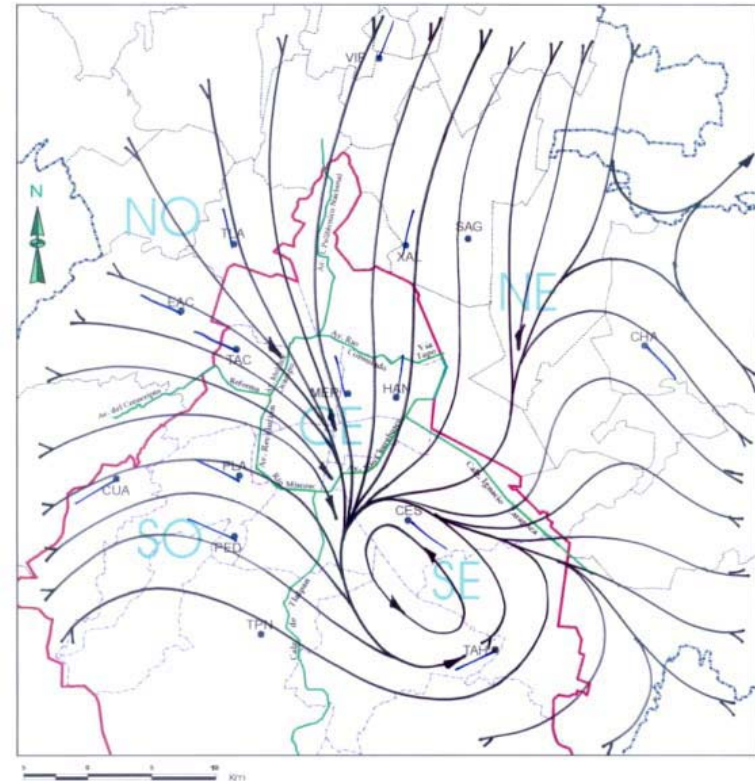


**Líneas de Flujo de viento promedio anual en el Valle de México a las 18:00 horas<sup>22</sup>.**

La Figura siguiente presenta el flujo de viento promedio anual a las 21:00 horas, el cual muestra la persistencia

<sup>22</sup> idem

de un vórtice ciclónico sobre el Sureste de la ZMVM y una línea de convergencia con flujo de viento desde el Noroeste.

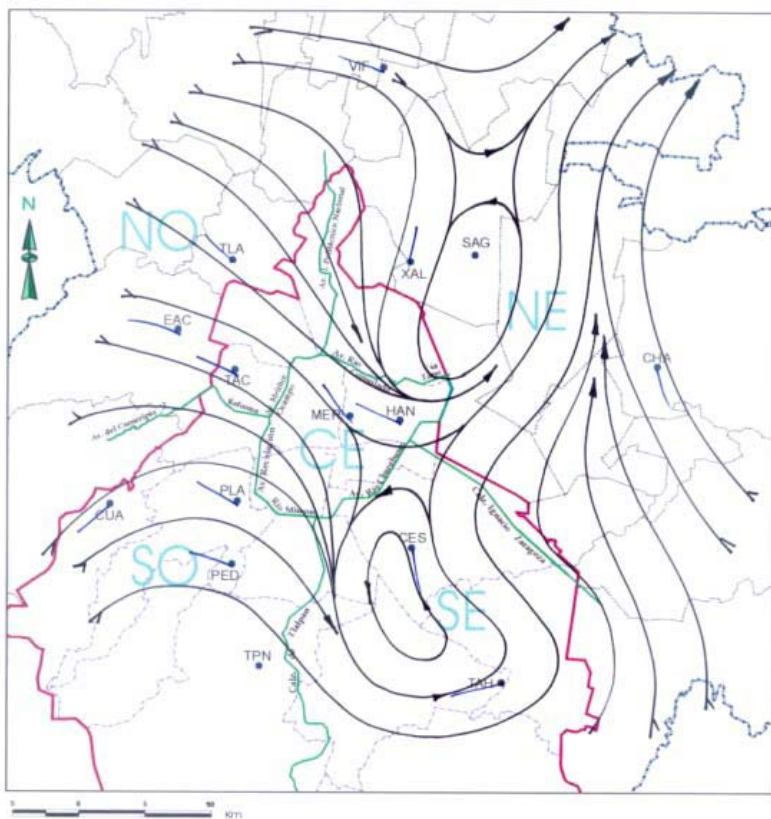


**Líneas de Flujo de viento promedio anual en el Valle de México a las 21:00 horas<sup>23</sup>.**

La Figura siguiente muestra el flujo de viento promedio anual a las 24:00 horas. En dicha figura se aprecia un flujo de viento dirigiéndose al Noreste desde el Occidente

<sup>23</sup> idem

de la ciudad, motivando la convergencia del viento en la parte central de la misma y la formación de dos vórtices ciclónicos: uno en el Noroeste y el otro en el Suroeste de la ZMVM.



**Líneas de Flujo de viento promedio anual en el Valle de México a las 24:00 horas<sup>24</sup>.**

<sup>24</sup> idem

#### 4.1.2 Tablas de viento

En esta parte se presentan los 2 promedios anuales del viento: 1) Promedio de dirección (promedio vectorial), que se obtiene encontrando las componentes en X e Y del vector dirección para sumarse algebraicamente y obtener así los promedios de cada una de ellas en grados y 2) Promedio de velocidad (promedio aritmético), según las regiones en que se divide la ZMVM. La Tabla siguiente presenta los promedios horarios anuales de la zona Noroeste con datos de las estaciones de monitoreo integrantes Tacuba (TAC), ENEP Acatlán (EAC) y Tlalneapantla (TLA). La Tabla 2.10 muestra los promedios horarios anuales de la zona Suroeste con datos de las estaciones Pedregal (PED), Plateros (PLA), Cuajimalpa (CUA) y Tlalpan (TPN).

#### Promedios anuales 2004 del viento de la zona Noroeste (NO).

Zona Noroeste<sup>25</sup>

TACUBA ENEP ACATLAN TLALNEPANTLA

HORA	Vel (m/s)	Dir (grad)	Vel (m/s)	Dir (grad)	Vel (m/s)	Dir (grad)
01:00	1.1	310	1.1	284	1.4	331
02:00	1.0	308	1.0	276	1.2	332
03:00	0.8	305	0.9	272	1.1	328
04:00	0.8	304	0.9	271	1.0	324
05:00	0.7	301	1.0	266	0.9	323
06:00	0.6	303	1.0	263	1.0	322
07:00	0.6	306	1.0	266	1.0	323
08:00	0.6	315	0.9	281	1.0	327
09:00	0.6	52	0.7	319	0.7	344
10:00	0.6	20	0.8	358	0.5	13
11:00	0.6	21	0.8	13	0.5	21
12:00	0.7	21	0.9	4	0.7	23
13:00	0.6	1	2	1.0	0.8	16
14:00	0.6	8	1.0	1	0.9	15
15:00	0.5	355	1.0	349	0.9	7
16:00	0.5	322	0.9	329	0.8	359

<sup>25</sup> idem

17:00	0.8	320	1.2	325	1.0	349
18:00	1.0	325	1.4	318	1.4	345
19:00	1.1	323	1.4	316	1.4	345
20:00	1.1	323	1.4	316	1.4	347
21:00	1.1	324	1.4	314	1.5	343
22:00	1.3	316	1.5	307	1.7	338
23:00	1.4	313	1.4	300	1.6	334
24:00	1.3	311	1.2	293	1.5	333

**Promedios anuales 2004 del viento de la zona Suroeste (SO).**

Zona Suroeste<sup>26</sup>

PEDREGAL PLATEROS CUAJIMALPA TLALPAN

HORA Vel (m/s) Dir (grad) Vel (m/s) Dir (grad) Vel (m/s) Dir (grad) Vel (m/s) Dir (grad)

01:00	0.7	289	0.7	303	1.3	233	SD
SD							
02:00	0.6	283	0.6	302	1.3	226	SD
SD							
03:00	0.6	280	0.6	300	1.4	225	SD
SD							
04:00	0.6	275	0.5	296	1.4	222	SD
SD							
05:00	0.6	273	0.5	293	1.4	220	SD
SD							
06:00	0.6	271	0.5	293	1.3	218	SD
SD							
07:00	0.6	272	0.5	293	1.2	220	SD
SD							
08:00	0.4	298	0.5	309	0.9	220	SD
SD							
09:00	0.6	23	0.5	350	0.1	223	SD
SD							
10:00	0.9	36	0.6	14	0.6	58	SD
SD							
11:00	1.0	39	0.6	15	0.9	60	SD
SD							
12:00	1.0	39	0.7	18	1.0	61	SD
SD							
13:00	1.0	35	0.7	15	0.8	59	SD
SD							

<sup>26</sup> idem

14:00	0.7	28	0.5	3	0.5	65	SD
SD							
15:00	0.5	13	0.4	350	0.1	130	SD
SD							
16:00	0.4	344	0.4	314	0.4	219	SD
SD							
17:00	0.5	324	0.6	305	0.8	237	SD
SD							
18:00	0.7	312	0.7	309	1.4	248	SD
SD							
19:00	0.7	311	0.9	313	1.8	249	SD
SD							
20:00	0.8	312	1.0	315	1.8	249	SD
SD							
21:00	0.8	312	1.0	317	1.8	254	SD
SD							
22:00	0.9	304	1.0	312	1.7	254	SD
SD							
23:00	0.9	299	0.9	309	1.6	248	SD
SD							
24:00	0.8	291	0.8	305	1.4	240	SD
SD							

SD = Sin Datos

En la siguiente se observan los promedios horarios anuales de la zona Noreste con datos de las estaciones de monitoreo San Agustín (SAG), Xalostoc (XAL), Villa de las Flores (VIF) y Chapingo (CHA).

**Promedios anuales 2004 del viento de la zona Noreste (NE).**

Zona Noreste<sup>27</sup>

SAN AGUSTIN XALOSTOC VILLA DE LAS

FLORES

CHAPINGO

HORA Vel (m/s) Dir (grad) Vel (m/s) Dir (grad) Vel (m/s) Dir (grad) Vel (m/s) Dir (grad)

01:00		SD	SD	0.5	3	0.5	304.03
	1.2		67				

<sup>27</sup> idem

02:00	SD	SD	0.4	7	0.5	309.49
	1.2	160				
03:00	SD	SD	0.4	7	0.5	309.73
	1.1	155				
04:00	SD	SD	0.4	3	0.4	323.98
	0.9	142				
05:00	SD	SD	0.4	16	0.4	335.22
	0.8	143				
06:00	SD	SD	0.4	29	0.4	333.81
	0.7	132				
07:00	SD	SD	0.3	35	0.4	332.11
	0.7	127				
08:00	SD	SD	0.4	56	0.4	346.28
	0.6	150				
09:00	SD	SD	0.4	90	0.5	28.61
	0.8	228				
10:00	SD	SD	0.4	97	0.9	58.26
	1.3	242				
11:00	SD	SD	0.4	88	1.4	66.52
	1.4	234				
12:00	SD	SD	0.5	61	1.5	65.94
	1.5	232				
13:00	SD	SD	0.5	43	1.5	63
	1.4	224				
14:00	SD	SD	0.5	21	1.4	59
	1.3	210				
15:00	SD	SD	0.5	17	1.3	55
	1.7	189				
16:00	SD	SD	0.5	14	1.4	52
	2.3	174				
17:00	SD	SD	0.7	16	1.1	47
	2.6	166				
18:00	SD	SD	0.9	24	0.9	45
	2.7	157				
19:00	SD	SD	0.9	25	0.8	53
	2.6	150				
20:00	SD	SD	1.0	34	0.9	56
	2.1	149				
21:00	SD	SD	1.0	20	0.7	42
	1.7	155				
22:00	SD	SD	0.9	10	0.5	8
	1.4	166				
23:00	SD	SD	0.7	9	0.4	325
	1.2	164				

24:00	SD	SD	0.6	5	0.5	300
	1.2	168				
SD = Sin Datos						

En la Tabla siguiente se exhiben los promedios horarios anuales de la zona Sureste con datos de las estaciones de monitoreo Cerro de la Estrella (CES) y Tláhuac (TAH).

### Promedios anuales 2004 del viento de la zona Sureste (SE).

Zona Sureste<sup>28</sup>

CERRO DE LA

ESTRELLA

TLAHUAC

HORA	Vel (m/s)	Dir (grad)	Vel (m/s)	Dir (grad)
01:00	0.4	163	2.0	249
02:00	0.5	157	1.6	241
03:00	0.5	151	1.5	232
04:00	0.4	146	1.3	231
05:00	0.5	147	1.2	220
06:00	0.5	148	1.2	232
07:00	0.5	146	1.1	229
08:00	0.5	141	0.4	208
09:00	0.5	132	0.4	10
10:00	0.5	14	0.7	324
11:00	0.5	104	0.9	292
12:00	0.4	90	0.8	274
13:00	0.4	88	0.5	254
14:00	0.4	103	0.6	168
15:00	0.6	137	1.2	154
16:00	0.6	150	1.6	161
17:00	0.7	144	1.6	171
18:00	0.7	145	2.1	182
19:00	0.6	145	2.3	202
20:00	0.4	148	2.2	233
21:00	0.3	151	2.4	254
22:00	0.3	161	2.6	261
23:00	0.4	172	2.5	261
24:00	0.4	169	2.3	257

<sup>28</sup> idem

La Tabla siguiente muestra los promedios horarios anuales de la zona Centro con datos de las estaciones de monitoreo Merced (MER) y Hangares (HAN).

**Promedios anuales 2004 del viento de la zona Centro (CE).**

Zona Centro<sup>29</sup>

MER HAN

HORAS	Vel (m/s)	Dir (grad)	Vel (m/s)	Dir (grad)
01:00	0.9	333	0.2	304
02:00	0.8	342	0.1	334
03:00	0.7	351	0.2	9
04:00	0.6	1	0.2	29
05:00	0.5	9	0.3	40
06:00	0.5	16	0.4	43
07:00	0.5	23	0.4	45
08:00	0.5	31	0.5	47
09:00	0.5	36	0.6	46
10:00	0.5	42	0.5	49
11:00	0.5	33	0.5	44
12:00	0.6	25	0.6	33
13:00	0.6	26	0.6	30
14:00	0.6	22	0.6	33
15:00	0.4	35	0.4	50
16:00	0.2	39	0.4	78
17:00	0.3	25	0.5	77
18:00	0.4	18	0.6	76
19:00	0.5	19	0.6	70
20:00	0.7	7	0.5	56
21:00	0.8	353	0.5	34
22:00	0.9	340	0.3	0
23:00	1.0	331	0.3	321
24:00	1.1	329	0.3	302

La Tabla siguiente indica el promedio anual del viento, por separado para cada una de las estaciones del Sistema de Monitoreo Atmosférico con torre meteorológica.

<sup>29</sup> idem

**Promedio anual del viento.**

ESTACION	Vel (m/s)	Dir (grad)
TAC	0.8	325
EAC	0.9	311
SAG	SD	SD
TLA	1.0	342
XAL	0.5	26
MER	0.6	4
PED	0.5	326
CES	0.4	140
PLA	0.6	321
HAN	0.4	41
VIF	0.6	38
CUA	0.8 2	35
TPN	SD	SD
CHA	1.2	173
TAH	1.1	231

SD = Sin Datos

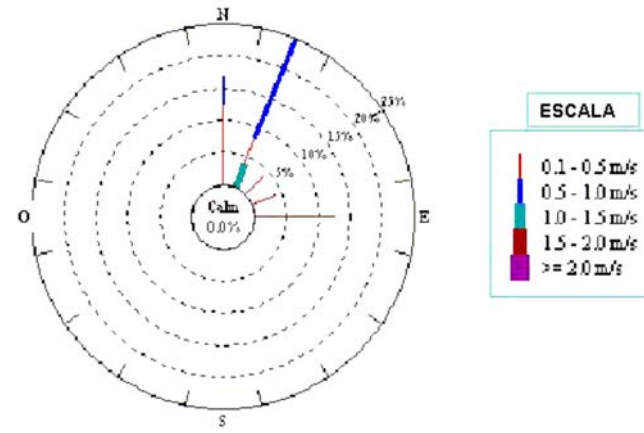
Una característica que se nota a primera vista en las tablas anteriores es la baja velocidad promedio que existe dentro del Valle, ya que la mayoría de los datos están por debajo de 1 m/s, aunque en algunos casos llega hasta 2.6 m/s.

**4.1.3 Rosas de viento**

En esta Sección se presentan las rosas de viento anuales de algunas estaciones con sensores meteorológicos; así como de toda la red de medición de la ZMVM. En las Figuras siguientes se presentan las rosas de viento anual para las estaciones Tlalnepantla (TLA), Xalostoc (XAL), Merced (MER), Pedregal (PED) y Cerro de la Estrella (CES) con datos del promedio horario en forma anual para cada estación; es decir, se usaron los resultados calculados vectorialmente para los promedios de dirección y de velocidad cada hora del día a lo largo del año; debido a que el viento es un parámetro con características vectoriales por tener magnitud y dirección. La interpretación para la Figura siguiente se debe tomar

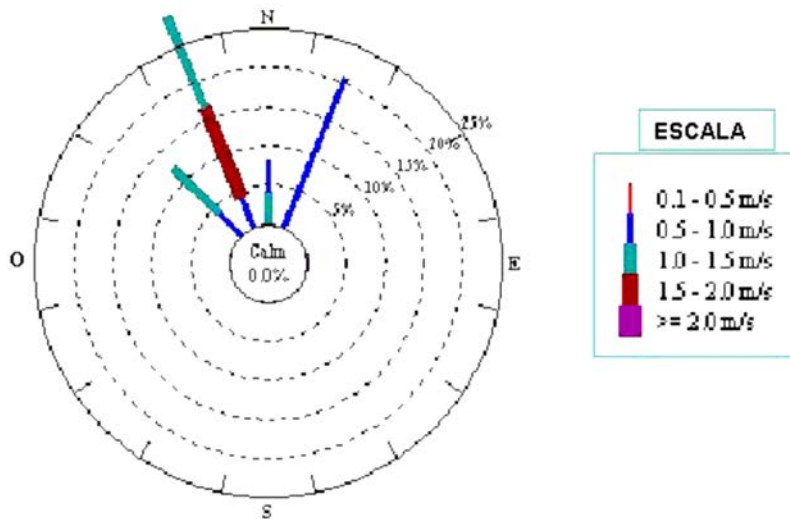
como sigue: En la estación Tlalnepantla (TLA) el viento que se presentó con mayor frecuencia durante el día, prácticamente todo el año, provino del Nor-noroeste y del Nornoroeste con velocidades entre 0.5 y 2.0 m/s. Con la misma idea se deben interpretar las restantes rosas de viento anuales. Hay que remarcar el hecho de que la mayoría de los datos presentan un rango de dirección de 315 a 45 grados; es decir, de componente norte, lo que significa que el transporte de los contaminantes fuera hacia la zona sur del Valle.

**Nota:** Con la idea de mantener una misma escala para todas las rosas a fin de que se haga más fácil la comparación, se propició que algunos "brazos" de algunas de las rosas, se salieran del círculo más externo.

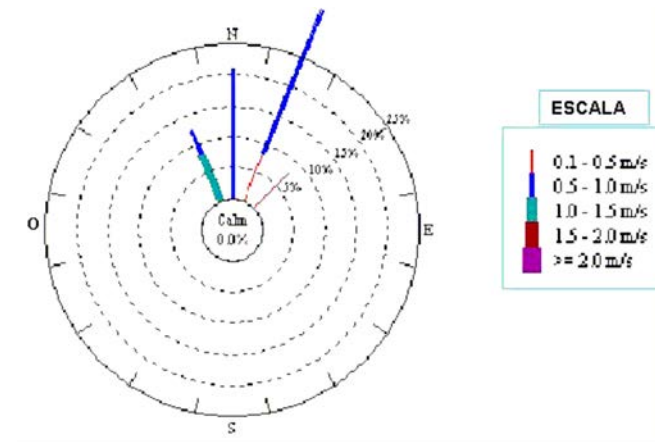


Informe climatológico ambiental 2004 D.F.

**Rosa de viento anual para la estación Tlalnepantla (TLA).  
Rosa de viento anual para la estación Xalostoc (XAL).**

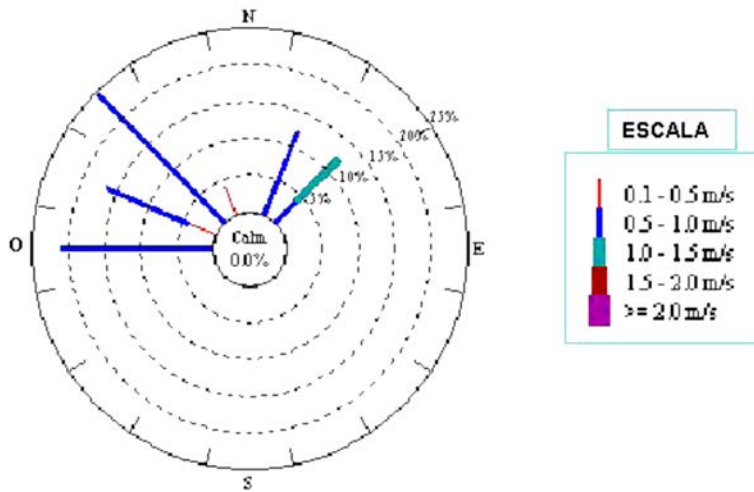


Informe climatológico ambiental 2004 D.F.



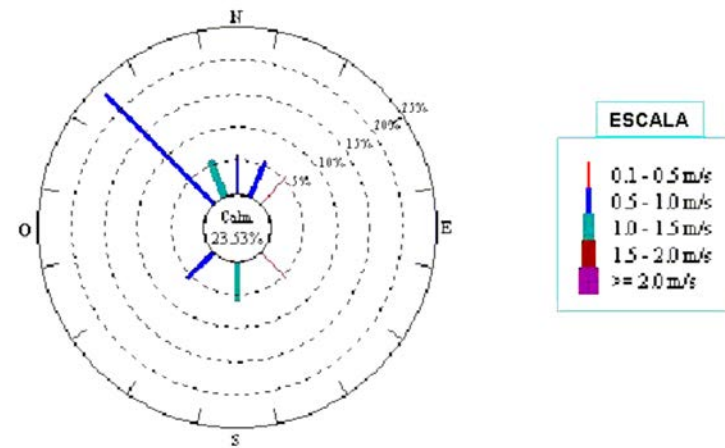
Informe climatológico ambiental 2004 D.F.





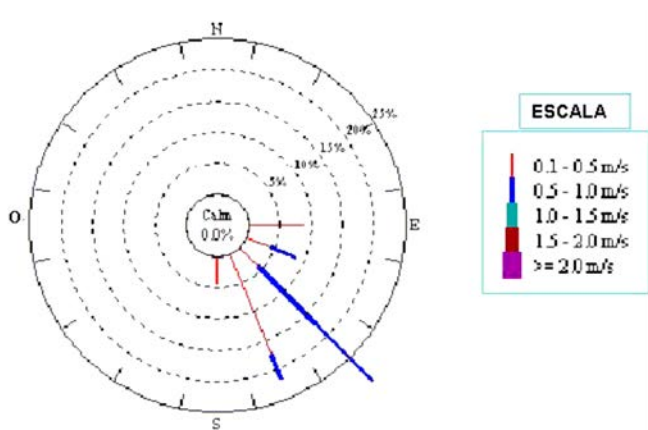
Informe climatológico ambiental 2004 D.F.

Rosa de viento anual para la estación Merced (MER). Rosa de viento anual para la estación Pedregal (PED).



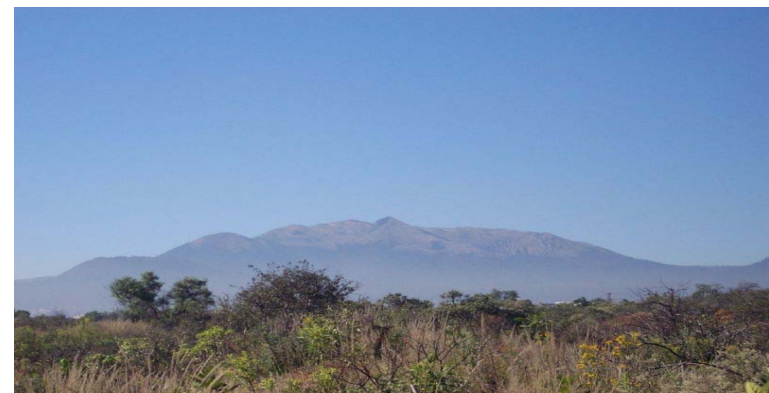
Informe climatológico ambiental 2004 D.F.

Rosa de viento anual para la estación Cerro de la Estrella (CES). Rosa de viento anual para la red meteorológica de la ZMVM.



Informe climatológico ambiental 2004 D.F.

## PROPUESTA



[www.tlalpan.gob.mx](http://www.tlalpan.gob.mx)



www.tlalpan.gob.mx

La sierra de Ajusco, es un pulmón importante para la ciudad de México, con pinos, encinos, oyamel y pastos, vegetación de bosque mixto, que genera oxígeno para los capitalinos, además de ser un refugio de especies animales en peligro de extinción y una importante zona de captación de agua, explicó la guía de este paseo.

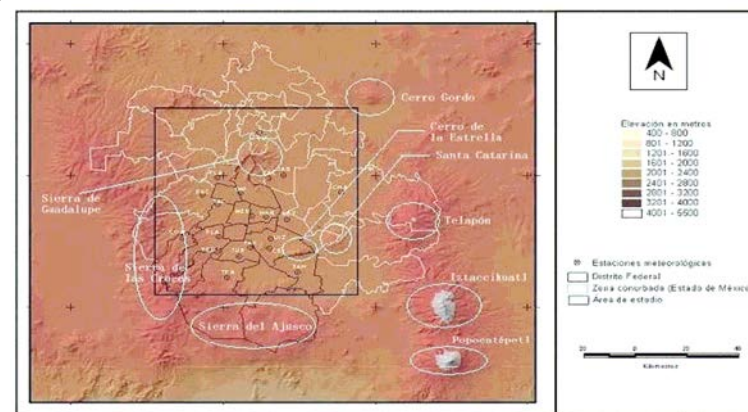
La sierra del Ajusco-Chichinauhtzin, conocida también como serranía del Ajusco, o sierra de Chichinauhtzin, es una cadena montañosa localizada entre las delegaciones de Tlalpan y Milpa Alta, en el sur del Distrito Federal. Alcanza su mayor elevación en el Pico del Águila, o Ajusco, a más de cuatro mil metros de altura sobre el nivel del mar. Otros picos importantes de esta cadena son los volcanes Xitle, Cuauhtzin, Chichinauhtzin y Tláloc.

Esta cadena forma el límite sur del Distrito Federal, separando el valle de México del valle de Morelos. Emergió durante el período cuaternario, con una intensa actividad volcánica que cerró la cuenca lacustre de México, privándola de su único drenaje natural hacia la

cuenca del río Balsas. La sierra del Ajusco forma parte de la provincia geológica *Lagos y Volcanes de Anáhuac*, localizada dentro del Eje Neovolcánico.

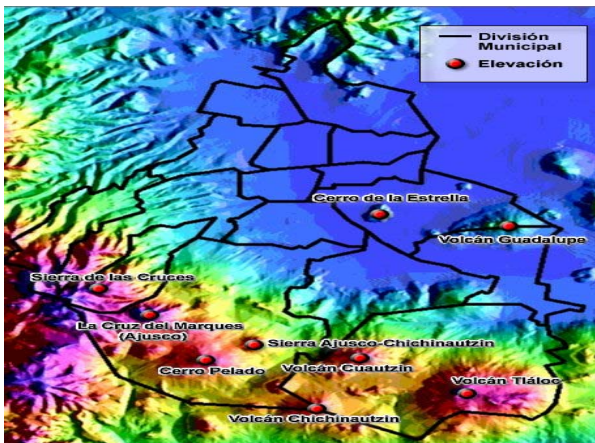
El Ajusco *flor de agua* en náhuatl (3,930 msnm) es un volcán situado al sur de la Ciudad de México en la Delegación Tlalpan del Distrito Federal de México. El Ajusco forma parte del Eje volcánico central que atraviesa el altiplano mexicano. El Ajusco se acompaña de un conjunto de otros volcanes y montañas que reciben el nombre genérico de Sierra o Serranía del Ajusco, entre ellos destaca el volcán Xitle (El volcán **Xitle** se encuentra a las faldas del Ajusco, en los alrededores de la Ciudad de México. Es un volcán del tipo Cono de ceniza (o *Cono de escorias*), es decir, con forma cónica y base redonda, una altura aproximada de 300m, y cuya pendiente está entre los 30° y 40°). La zona boscosa alledaña es también el punto principal del Parque Nacional Cumbres del Ajusco.

Elevaciones principales en el D.F. la principal la sierra del ajusco

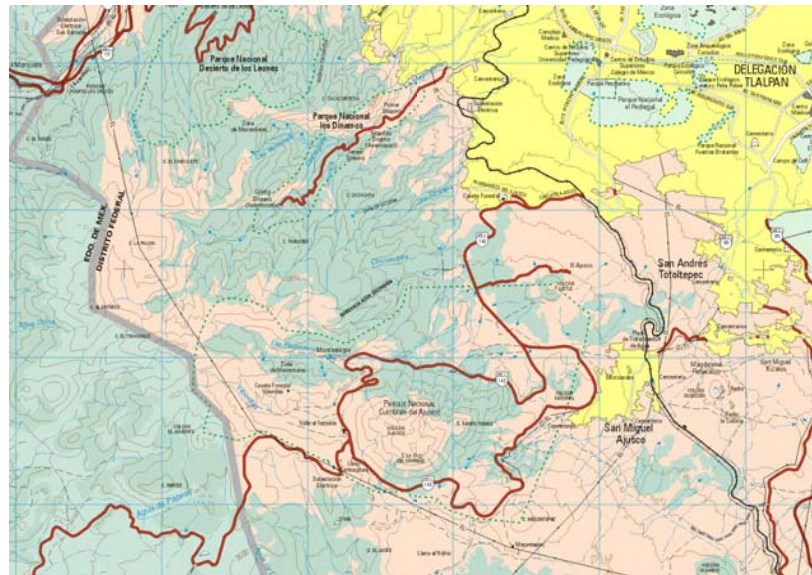


www.igeograf.unam.mx

Localización



www.inegi.gob.mx



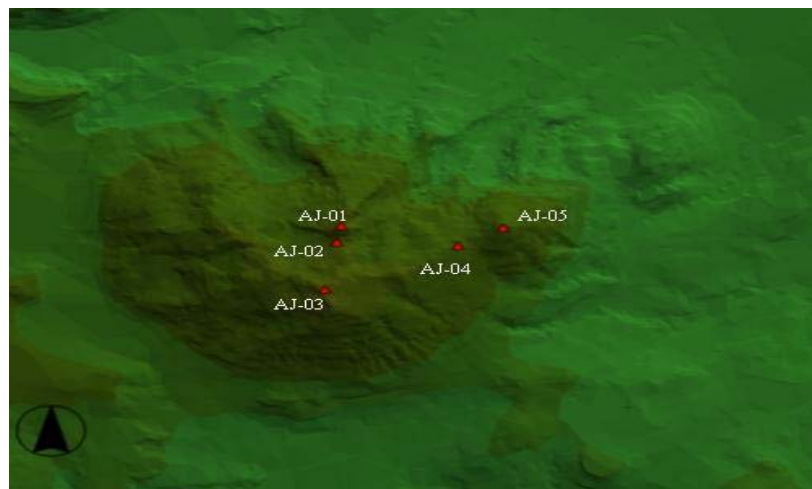
[www.mapas de México.com.mx](http://www.mapas.deMexico.com.mx)



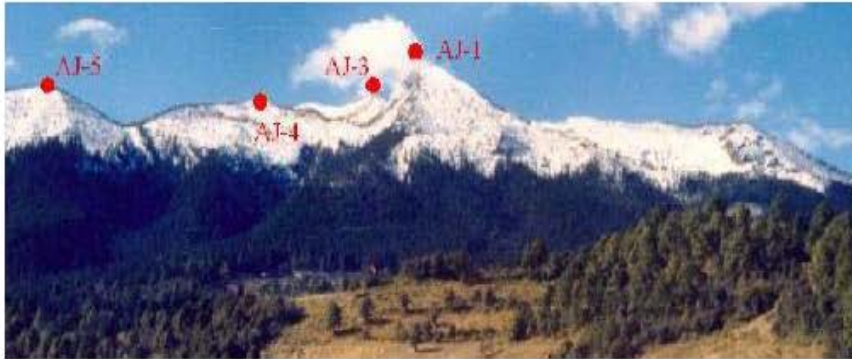
www.inegi.gob.mx



Zona más baja      Zona más alta  
cartografía del ajusco



www.inah.gob.mx



www.inah.gob.mx

En una prospección realizada por alumnos de la ENAH en enero de 1995 se identificaron los sitios: Cuahutepetl (AJ-01) en la cima norte del volcán denominada Pico de águila a 3,900 m conformado por una cueva y un par de plataformas con material cerámico muy erosionado; El Collado del águila (AJ-02), entre las cimas del Pico de águila y Cruz del Marques, en dos puntos, sobre un arenal al oeste y sobre una arista a 3,860 m; Ehecacalco (AJ-03) en la cima mayor conocida como Cruz del Márquez, a 3,930 m sobre dos; El Collado de Ehecatl (AJ-04) entre las cima oriental denominada Sto. Tomas y la Cruz del Márquez; por ultimo el sitio Santo Tomas (AJ-05) en la cima del mismo nombre a 3,860 m.

#### **Localización**

##### Santo Tomás Ajusco y San Miguel Ajusco

Santo Tomás Ajusco y San Miguel Ajusco son los dos pueblos que se arraigaron en la zona hace muchos años, aún antes de la llegada del imperio español a tierras aztecas. La superficie aproximada es de 5699 hectáreas en posesión y 1800 hectáreas en litigio, la altura varía en la zona, desde los 2925 m a los 3000 metros sobre el

nivel del mar. Los pueblos del Ajusco se dividen en dos barrios o pueblos: Santo Tomás Ajusco y San Miguel Ajusco, los cuales prácticamente se funden en uno mismo dado el crecimiento de ambos. El pueblo tiene 300 hectáreas de superficie, y esta comunicado con un camino de 7.1 km de la carretera Mexico-Cuernavaca.

Santo Tomás se ubica en el cerro Santo Tomás que mide 3,710 metros, y la población se estima en 9500 habitantes aproximadamente. Los límites entre San Miguel y Santo Tomás son imperceptibles, ya que el crecimiento urbano ha hecho que prácticamente sea un solo pueblo, aunque la gente se identifica con aquel del cual es originario. Servicios Públicos disponibles: Los pueblos del Ajusco cuentan con servicio de electricidad, aunque tiende a tener muchas fallas y los transformadores no son suficientes. Las calles y caminos están pavimentados, existe servicio de drenaje y alcantarillado, existen líneas de teléfono y también hay servicio de agua potable pero deficiente ya que en numerosas ocasiones se corta el servicio y tienen que abastecerse por medio de pipas de agua. El transporte público tiene una ruta que cubre la zona desde muy temprano en la mañana pero se suspende alrededor de las 10 de la noche. El sistema de correo es deficiente y poco utilizado. Educación: Santo Tomás tiene una escuela primaria, Una escuela secundaria, Un jardín de niños y una escuela especial. Cuentan con la Biblioteca Santo Tomás Ajusco. En términos de salud Santo Tomás solo tiene un centro de salud y es pequeño, no cuenta con instalaciones especializadas ni equipo necesario. Fiestas del pueblo: 2 de febrero, día de la candelaria, 3 de julio, nacimiento de Santo Tomás Apóstol y 21 de diciembre, festejo en honor a Santo Tomás Apóstol, en estas fechas

se realizan diferentes actividades culturales y de recreación para la población que es su mayoría es católica.

## TERRENO



[www.mapas](http://www.mapas.deMéxico.com.mx) de México.com.mx

### Terreno 100 ha.



[www.mapas](http://www.mapas.deMéxico.com.mx) de México.com.mx

Terreno localizado en el pueblo de Santo Tomás Ajusco a un costado del paso del FFCC. de Cuernavaca, y vecino de la estación meteorológica del Ajusco del SMN. Cuenta con una superficie de 10 ha. y tiene una elevación de 2850 mts. snm. Junto a el se encuentra también la estación de radio la colonia. Tiene fácil acceso ya que existen carreteras pavimentadas y terracerías para llegar a el. El uso de suelo de la zona pertenece al área de cultivo y áreas verdes. Debido a que el flujo de viento promedio anual al medio día donde se observa la evolución del flujo predominante, siendo de Norte a Sur, con una velocidad promedio de 3 m/s. durante todo el año (ver datos anteriores) interactuando con una línea de convergencia en el Sur; se ha decidido hacer la propuesta del parque eólico en esta zona con una capacidad 1,575 kW, constituida por siete aerogeneradores de 225 kW. Con una separación de 60 mts entre una y otra unidad. La energía generada por la Central se enviaría a través de la subestación eléctrica que consta de tres transformadores elevadores de potencial de 480 V a 13,800 V, con capacidades de 500 KVA. dos de ellos y el otro de 750 KVA.; y que cuenten también con un restaurador para protección de la Central y cuchillas seccionadoras después de cada transformador y antes de la conexión a la línea de 13.8 KV. La ficha técnica de los aerogeneradores para propuesta sería la siguiente:

7	Unidades 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7
Marca	Vestas (empresa de Dinamarca)
Capacidad de cada unidad	225 KW.
Capacidad instalada	1,575 KW.
Altura de las torres	31.5 mts.

Orientación de las torres	Este-oeste en línea recta
Dirección de los vientos predominantes	Norte-sur
Rango de aprovechamiento del viento	5 a 25 metros por segundo
No. de aspas (álabes)	3
Diámetro de giro de las aspas (álabes)	27 metros
Velocidad de giro en el generador	900 / 1200 r.p.m.
Voltaje de generación	480 Volts
Frecuencia	60 Hz.
Tipo de generador eléctrico	Asíncrono
Voltaje del generador eléctrico	3 x 480 Volts
No. de polos del generador eléctrico	6-8
Velocidad nominal	1209-906 r.p.m.
Población que alimenta	la Venta.

## V. APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PARA TRANSFORMAR LA ENERGÍA EÓLICA

### 5.1 Que son los aerogeneradores?

Un aerogenerador es un generador de electricidad activado por la acción del viento. Sus precedentes directos son los molinos de viento que se empleaban para la molienda y obtención de harina. Máquina que utiliza la energía cinética del viento para mover las palas de un rotor y producir energía eléctrica

En este caso, la energía eólica (energía cinética) mueve la hélice y, a través de un sistema mecánico de engranajes, hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

Para aportar energía a la red eléctrica, los aerogeneradores deben estar dotados de un sofisticado sistema de sincronización para que la frecuencia de la corriente generada se mantenga perfectamente sincronizada con la de la red. Usar molinos de viento para producir electricidad fue un invento de Minoru Abe, perteneciente a la Agencia de Ciencia y Tecnología japonesa, en 1980.

### 5.5.1 De que están hechos

#### Componentes de un aerogenerador

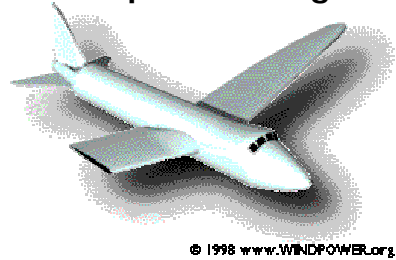
- 2 Gondola,
- 3 Palas del rotor,
- 4 Buje,
- 5 Eje de baja velocidad,
- 6 Multiplicador,
- 7 Eje de alta velocidad con su freno mecánico,
- 8 Generador eléctrico,
- 9 Mecanismo de orientación,
- 10 Sistema hidráulico,
- 11 La unidad de refrigeración,
- 12 Torre,
- 13 Anemómetro
- 14 La veleta.

La **gondola** contiene los componentes clave del aerogenerador, incluyendo el multiplicador y el generador eléctrico. El personal de servicio puede entrar en la gondola desde la torre de la turbina. A la izquierda de la

góndola tenemos el rotor del aerogenerador, es decir, las palas y el buje.

**Las palas de rotor** capturan el viento y transmiten su potencia hacia el buje. En un aerogenerador moderno de 1000 kW cada pala mide alrededor de 27 metros de longitud y su diseño es muy parecido al del ala de un avión. El rotor, compuesto por las palas del rotor y el buje, está situado corriente arriba de la torre y la góndola en la mayoría de aerogeneradores modernos. Esto se hace sobretodo porque la corriente de aire tras la torre es muy irregular (turbulenta).

**¿Qué es lo que hace que el rotor gire?**



“La respuesta parece obvia: el viento. Pero en realidad, no se trata simplemente de moléculas de aire que chocan contra la parte delantera de las palas del rotor. Los aerogeneradores modernos toman prestada de los aviones y los helicópteros tecnología ya conocida, además de tener algunos trucos propios más avanzados,

ya que los aerogeneradores trabajan en un entorno realmente muy diferente, con cambios en las velocidades y en las direcciones del viento.

### Sustentación



© 1998 www.WINDPOWER.dk

Eche un vistazo al perfil cortado (sección transversal) del ala de un avión. La razón por la que un aeroplano puede volar es que el aire que se desliza a lo largo de la superficie superior del ala se mueve más rápidamente que el de la superficie inferior.

Esto implica una presión más baja en la superficie superior, lo que crea la sustentación, es decir, la fuerza de empuje hacia arriba que permite al avión volar.

La sustentación es perpendicular a la dirección del viento. El fenómeno de la sustentación es desde hace siglos bien conocido por la gente que trabaja en la construcción de tejados: saben, por experiencia, que el material de la cara a sotavento del tejado (la cara que no da al viento) es arrancado rápidamente, si no está correctamente sujeto a su estructura”<sup>30</sup>.

<sup>30</sup> www.windpower.gob

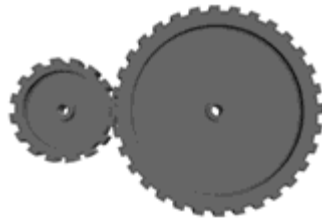
**El buje** del rotor está acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador

**El eje de baja velocidad** del aerogenerador conecta el buje del rotor al multiplicador. En un aerogenerador moderno de 600 kW el rotor gira bastante lentamente, de unas 19 a 30 revoluciones por minuto (r.p.m.). El eje contiene conductos del sistema hidráulico para permitir el funcionamiento de los frenos aerodinámicos.

**El multiplicador** tiene a su izquierda el eje de baja velocidad. Permite que el eje de alta velocidad que está a su derecha gire 50 veces más rápidamente que el eje de baja velocidad.

Cajas multiplicadoras para aerogeneradores

### **¿Por qué utilizar una caja multiplicadora?**



© 1998 www.WINDPOWER.dk

La potencia de la rotación del rotor de la turbina eólica es transferida al generador a través del tren de potencia, es

decir, a través del eje principal, la caja multiplicadora y el eje de alta velocidad, como vimos en la página con los componentes de un aerogenerador.

Pero, ¿por qué utilizar una caja multiplicadora? ¿No podríamos hacer funcionar el generador directamente con la energía del eje principal?

Si usásemos un generador ordinario, directamente conectado a una red trifásica de CA (corriente alterna) a 50 Hz, con dos, cuatro o seis polos, deberíamos tener una turbina de velocidad extremadamente alta, de entre 1000 y 3000 revoluciones por minuto (r.p.m.), como podemos ver en la página sobre cambio de la velocidad de giro del generador. Con un rotor de 43 metros de diámetro, esto implicaría una velocidad en el extremo del rotor de bastante más de dos veces la velocidad del sonido, así es que deberíamos abandonar esta opción.

Otra posibilidad es construir un generador de CA lento con muchos polos. Pero si quisiera conectar el generador directamente a la red, acabaría con un generador de 200 polos (es decir, 300 imanes) para conseguir una velocidad de rotación razonable de 30 r.p.m.

Otro problema es que la masa del rotor del generador tiene que ser aproximadamente proporcional a la



cantidad de par torsor (momento, o fuerza de giro) que tiene que manejar. Así que, en cualquier caso, un generador accionado directamente será muy pesado (y caro).

### **Menos par torsor, más velocidad**

La solución práctica, utilizada en dirección contraria en muchas máquinas industriales, y que está relacionada con los motores de automóviles, es la de utilizar un multiplicador.

Con un multiplicador hace la conversión entre la potencia de alto par torsor, que obtiene del rotor de la turbina eólica girando lentamente, y la potencia de bajo par torsor, a alta velocidad, que utiliza en el generador.

La caja multiplicadora de la turbina eólica no "cambia las velocidades". Normalmente, suele tener una única relación de multiplicación entre la rotación del rotor y el generador. Para una máquina de 600 ó 750 kW, la relación de multiplicación suele ser aproximadamente de 1:50.

La fotografía de abajo muestra una caja multiplicadora para aerogenerador de 1,5 MW. Esta particular caja multiplicadora es un tanto inusual, pues tiene bridas para acoplar dos generadores en la parte de alta velocidad (en

la derecha). Los accesorios naranja, que están justo debajo de los dispositivos de sujeción de los generadores (derecha), son frenos de emergencia de disco accionados hidráulicamente. El fondo puede ver la parte inferior de una góndola para una turbina de 1,5 kW.



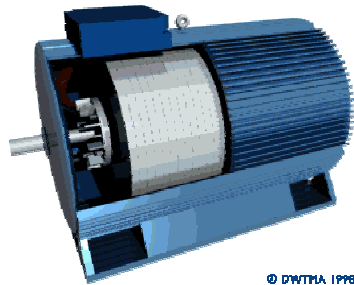
[www.windpower.gob](http://www.windpower.gob)

**El generador eléctrico** llamarse generador asíncrono o de inducción. En un aerogenerador moderno la potencia máxima suele estar entre 500 y 3000 kilovatios (kW).

### **Generadores de turbinas eólicas**

Puede ver el ventilador de refrigeración interno moviéndose dentro de este generador. Está montado en la parte posterior del rotor, que está oculto dentro del

cilindro de acero magnético brillante, llamado estator. La superficie del radiador refrigera el generador. Es difícil ver los detalles en un generador de verdad como el de la derecha.



El aerogenerador convierte la energía mecánica en energía eléctrica. Los aerogeneradores son algo inusuales, si se les compara con los otros equipos generadores que suelen encontrarse conectados a la red eléctrica. Una de las razones es que el generador debe trabajar con una fuente de potencia (el rotor de la turbina eólica) que suministra una potencia mecánica muy variable (momento torsor).

En estas páginas se asume que usted está familiarizado con la bases de electricidad, electromagnetismo y, en particular, con corriente alterna. Si alguna de las expresiones voltio (V), fase, trifásica, frecuencia o Herzio (Hz) le suena rara, eche un vistazo al manual de referencia sobre electricidad , y lea sobre corriente

alterna , corriente alterna trifásica , electromagnetismo e inducción , antes de seguir con las siguientes páginas.

### **Voltaje generado (tensión)**

En grandes aerogeneradores (alrededor de 100-150 kW) el voltaje (tensión) generado por la turbina suele ser de 690 V de corriente alterna trifásica (AC). Posteriormente, la corriente es enviada a través de un transformador anexo a la turbina (o dentro de la torre), para aumentar su voltaje entre 10.000 y 30.000 V, dependiendo del estándar de la red eléctrica local.

Los grandes fabricantes proporcionan modelos de aerogeneradores tanto de 50 Hz (para las redes eléctricas de la mayor parte del mundo) y de 60 Hz (para la red eléctrica de América).

### **Sistema de refrigeración**

Los generadores necesitan refrigeración durante su funcionamiento. En la mayoría de turbinas la refrigeración se lleva a cabo mediante encapsulamiento del generador en un conducto, utilizando un gran ventilador para la refrigeración por aire, aunque algunos fabricantes usan generadores refrigerados por agua. Los generadores refrigerados por agua pueden ser construidos de forma más compacta, lo que también les

proporciona algunas ventajas en cuanto a rendimiento eléctrico se refiere, aunque precisan de un radiador en la góndola para eliminar el calor del sistema de refrigeración por líquido.

### **Arranque y parada del generador**

Si conecta (o desconecta) un gran generador de turbina eólica a la red simplemente accionando un interruptor corriente, muy probablemente dañará el generador, el multiplicador y la corriente de red del vecindario.

Más tarde conocerá como los diseñadores de aerogeneradores tratan este tema en la página cuestiones sobre calidad de potencia.

### **Opciones de diseño en generadores y conexión a red**

Las turbinas eléctricas pueden ser diseñadas tanto con generadores síncronos como asíncronos, y con varias formas de conexión directa o conexión indirecta a red del generador. La conexión directa a red significa que el generador está conectado directamente a la red de corriente alterna (generalmente trifásica). La conexión indirecta a red significa que la corriente que viene de la turbina pasa a través de una serie de dispositivos eléctricos que ajustan la corriente para igualarla a la de

la red. En generadores asíncronos esto ocurre de forma automática.

**El mecanismo de orientación** es activado por el controlador electrónico, que vigila la dirección del viento utilizando la veleta. El dibujo muestra la orientación de la turbina. Normalmente, la turbina sólo se orientará unos pocos grados cada vez, cuando el viento cambia de dirección.

### **Mecanismo de orientación**

El mecanismo de orientación de un aerogenerador es utilizado para girar el rotor de la turbina en contra del viento.

### **Error de orientación**

Se dice que la turbina eólica tiene un error de orientación si el rotor no está perpendicular al viento. Un error de orientación implica que una menor proporción de la energía del viento pasará a través del área del rotor (para aquéllos que saben matemáticas, esta proporción disminuirá con el coseno del error de orientación).

Si esto fuera lo único que ocurre, el mecanismo de orientación sería una excelente forma de controlar la potencia de entrada al rotor del aerogenerador. Sin embargo, la parte del rotor más próxima a la dirección de

la fuente de viento estará sometida a un mayor esfuerzo (par flector) que el resto del rotor. De una parte, esto implica que el rotor tendrá una tendencia natural a orientarse en contra del viento, independientemente de si se trata de una turbina corriente abajo o corriente arriba. Por otro lado, esto significa que las palas serán torsionadas hacia ambos lados en la dirección de "flap" (dirección perpendicular al plano del rotor) a cada vuelta del rotor. Por tanto, las turbinas eólicas que estén funcionando con un error de orientación estarán sujetas a mayores cargas de fatiga que las orientadas en una dirección perpendicular al viento.

### **Mecanismo de orientación**

Casi todos los aerogeneradores de eje horizontal emplean orientación forzada, es decir, utilizan un mecanismo que mantiene la turbina orientada en contra del viento mediante motores eléctricos y multiplicadores.

La imagen muestra el mecanismo de orientación de una máquina típica de 750 kW vista desde abajo, mirando hacia la góndola. En la parte más exterior podemos distinguir la corona de orientación, y en el interior las ruedas de los motores de orientación y los frenos del sistema de orientación. Casi todos los fabricantes de

máquinas con rotor a barlovento prefieren frenar el mecanismo de orientación cuando no está siendo utilizado. El mecanismo de orientación se activa por un controlador electrónico que vigila la posición de la veleta de la turbina varias veces por segundo, cuando la turbina está girando.

### **Contador de la torsión de los cables**



© 1998 www.WINDPOWER.org

Los cables llevan la corriente desde el generador de la turbina eólica hacia abajo a lo largo de la torre. Sin embargo, los cables estarán cada vez más torsionados si la turbina, por accidente, se sigue orientando en el mismo sentido durante un largo periodo de tiempo. Así pues, los aerogeneradores están equipados con un contador de la torsión en los cables que avisará al controlador de cuando es necesario detorsionar los cables. Por tanto, es posible que alguna vez vea una turbina que parezca que haya perdido los estribos,

orientándose continuamente en la misma dirección durante cinco vueltas.

Como en los otros equipos de seguridad en la turbina, el sistema es redundante. En este caso, la turbina está equipada también con un interruptor de cordón que se activa cuando los cables se torsionan demasiado.

**El controlador electrónico** tiene un ordenador que continuamente monitoriza las condiciones del aerogenerador y que controla el mecanismo de orientación. En caso de cualquier disfunción (por ejemplo, un sobrecalentamiento en el multiplicador o en el generador), automáticamente para el aerogenerador y llama al ordenador del operario encargado de la turbina a través de un enlace telefónico mediante módem.

### **El controlador electrónico de la turbina eólica**

El controlador de la turbina eólica consta de varios ordenadores que continuamente supervisan las condiciones de la turbina eólica, y recogen estadísticas de su funcionamiento. Como su propio nombre indica, el controlador también controla un gran número de

interruptores, bombas hidráulicas, válvulas y motores dentro de la turbina.

Cuando el tamaño de una turbina eólica crece hasta máquinas de megavatios, se hace incluso más importante que su tasa de disponibilidad sea alta, es decir, que funcionen de forma segura todo el tiempo.

### **Comunicación con el mundo exterior**

El controlador se comunica con el propietario o el operador de la turbina eólica mediante un enlace de comunicación, como por ejemplo, enviando alarmas o solicitudes de servicio a través del teléfono o de un enlace radiofónico. También es posible llamar a la turbina eólica para que recoja estadísticas, y revise su estado actual. En parques eólicos, normalmente una de las turbinas estará equipada con un PC, desde el que es posible controlar y recoger datos del resto de los aerogeneradores del parque. Este PC será llamado a través de una línea telefónica o un enlace radiofónico.

### **Comunicaciones internas**

Normalmente, suele haber un controlador en la parte inferior de la torre y otro en la góndola. En los modelos recientes de aerogeneradores, la comunicación entre

controladores suele hacerse utilizando fibra óptica. La imagen de la derecha muestra una unidad de comunicaciones de fibra óptica.

En algunos modelos recientes, hay un tercer controlador situado en el buje del rotor. Esta unidad suele comunicarse con la góndola utilizando comunicaciones en serie, a través de un cable conectado con anillos rozantes y escobillas al eje principal.

### **Mecanismos de autoprotección y redundancia**

Los ordenadores y sensores suelen estar por duplicado (son redundantes) en todas las áreas de precisión, de seguridad o de servicio, de las máquinas grandes más nuevas. El controlador compara continuamente las lecturas de las medidas en toda la turbina eólica, para asegurar que tanto los sensores como los propios ordenadores funcionan correctamente. La fotografía del principio de la página muestra el controlador de una máquina de un megavatio, que tiene dos ordenadores centrales (quitamos la tapa en uno de los dos ordenadores para mostrar la electrónica).

### **¿Qué está monitorizado?**

Es posible monitorizar o fijar alrededor de entre 100 y 500 valores de parámetros en una turbina eólica moderna. Por ejemplo, el controlador puede contrastar la

velocidad de rotación del rotor, el generador, su voltaje y corriente. Además, los rayos y su carga pueden ser registrados. También pueden realizarse medidas de la temperatura del aire exterior, la temperatura en los armarios electrónicos, la temperatura del aceite en el multiplicador, la temperatura de los devanados del generador, la temperatura de los cojinetes del multiplicador, la presión hidráulica, el ángulo de paso de cada pala del rotor (en máquinas de regulación por cambio del ángulo de paso -pitch controlled- o de regulación activa por pérdida aerodinámica -active stall controlled-), el ángulo de orientación (contando el número de dientes en la corona de orientación), el número de vueltas en los cables de alimentación, la dirección del viento, la velocidad del viento del anemómetro, el tamaño y la frecuencia de las vibraciones en la góndola y en las palas del rotor, el espesor de las zapatas del freno, si la puerta de la torre está abierta o cerrada (sistema de alarma).

### **Estrategias de control**

Muchos de los secretos de empresa de los fabricantes de aerogeneradores se encuentran en la forma en que el controlador interacciona con los componentes de la

turbina eólica. Las mejores estrategias de control son responsables de una parte importante del crecimiento de la productividad de los aerogeneradores en los últimos años.

Una estrategia interesante seguida por algunos fabricantes es la de adaptar la estrategia operacional al clima eólico local. De esta forma, puede ser posible, por ejemplo, minimizar el desgaste y la rotura de la máquina durante los (raros) periodos de clima tormentoso.

**El sistema hidráulico** es utilizado para restaurar los frenos aerodinámicos del aerogenerador.

**La unidad de refrigeración** contiene un ventilador eléctrico utilizado para enfriar el generador eléctrico. Además contiene una unidad de refrigeración del aceite empleada para enfriar el aceite del multiplicador. Algunas turbinas tienen generadores enfriados por agua.

### **Sistema de refrigeración**

Los generadores necesitan refrigeración durante su funcionamiento. En la mayoría de turbinas la refrigeración se lleva a cabo mediante encapsulamiento del generador en un conducto, utilizando un gran ventilador para la refrigeración por aire, aunque algunos fabricantes usan generadores refrigerados por agua. Los

generadores refrigerados por agua pueden ser construidos de forma más compacta, lo que también les proporciona algunas ventajas en cuanto a rendimiento eléctrico se refiere, aunque precisan de un radiador en la góndola para eliminar el calor del sistema de refrigeración por líquido.

### **Arranque y parada del generador**

Si conecta (o desconecta) un gran generador de turbina eólica a la red simplemente accionando un interruptor corriente, muy probablemente dañará el generador, el multiplicador y la corriente de red del vecindario.

Más tarde conocerá como los diseñadores de aerogeneradores tratan este tema en la página cuestiones sobre calidad de potencia.

### **Opciones de diseño en generadores y conexión a red**

Las turbinas eléctricas pueden ser diseñadas tanto con generadores síncronos como asíncronos, y con varias formas de conexión directa o conexión indirecta a red del generador. La conexión directa a red significa que el generador está conectado directamente a la red de corriente alterna (generalmente trifásica). La conexión indirecta a red significa que la corriente que viene de la

turbina pasa a través de una serie de dispositivos eléctricos que ajustan la corriente para igualarla a la de la red. En generadores asíncronos esto ocurre de forma automática.

**El anemómetro y la veleta** se utilizan para medir la velocidad y la dirección del viento. Las señales electrónicas del anemómetro son utilizadas por el controlador electrónico del aerogenerador para conectar el aerogenerador cuando el viento alcanza aproximadamente 5 metros por segundo. El ordenador parará el aerogenerador automáticamente si la velocidad del viento excede de 25 metros por segundo, con el fin de proteger a la turbina y sus alrededores. Las señales de la veleta son utilizadas por el controlador electrónico del aerogenerador para girar al aerogenerador en contra del viento, utilizando el mecanismo de orientación.

### **Medición de la velocidad del viento: anemómetros**

Las mediciones de las velocidades del viento se realizan normalmente usando un anemómetro de cazoletas, similar al del dibujo de la izquierda. El anemómetro de cazoletas tiene un eje vertical y tres cazoletas que

capturan el viento. El número de revoluciones por segundo son registradas electrónicamente.

Normalmente, el anemómetro está provisto de una veleta para detectar la dirección del viento.

En lugar de cazoletas el anemómetro puede estar equipado con hélices, aunque no es lo habitual.

Otros tipos de anemómetros incluyen ultrasonidos o anemómetros provistos de láser que detectan el desfase del sonido o la luz coherente reflejada por las moléculas de aire. Los anemómetros de hilo electrocalentado detectan la velocidad del viento mediante pequeñas diferencias de temperatura entre los cables situados en el viento y en la sombra del viento (cara a sotavento).

La ventaja de los anemómetros no mecánicos es que son menos sensibles a la formación de hielo. Sin embargo en la práctica los anemómetros de cazoletas son ampliamente utilizados, y modelos especiales con ejes y cazoletas eléctricamente calentados pueden ser usados en las zonas árticas.

### **Los anemómetros de calidad son una necesidad para las mediciones de energía eólica**

Cuando compra algo, a menudo obtendrá un producto acorde a lo que ha pagado por él. Esto también se aplica



a los anemómetros. Se pueden comprar anemómetros sorprendentemente baratos de algunos de los principales vendedores del mercado que, cuando realmente no se necesita una gran precisión, pueden ser adecuados para aplicaciones meteorológicas, y lo son también para ser montados sobre aerogeneradores. \*)

Sin embargo, los anemómetros económicos no resultan de utilidad en las mediciones de la velocidad de viento que se llevan a cabo en la industria eólica, dado que pueden ser muy imprecisos y estar pobremente calibrados, con errores en la medición de quizás el 5 por ciento, e incluso del 10 por ciento.

Si está pensando construir un parque eólico puede resultar un desastre económico si dispone de un anemómetro que mide las velocidades de viento con un error del 10%. En ese caso, se expone a contar con un contenido energético del viento que es  $1,1^3 - 1 = 33\%$  más elevado de lo que es en realidad. Si lo que tiene que hacer es recalcular sus mediciones para una altura de buje del aerogenerador distinta (digamos de 10 a 50 metros de altura), ese error podrá incluso multiplicarse por un factor del 1,3, con lo que sus cálculos de energía acabarán con un error del 75%.

Se puede comprar un anemómetro profesional y bien calibrado, con un error de medición alrededor del 1%, por unos 700-900 dólares americanos, lo que no es nada comparado con el riesgo de cometer un error económico potencialmente desastroso. Naturalmente, el precio puede no resultar siempre un indicador fiable de la calidad, por lo que deberá informarse de cuáles son los institutos de investigación en energía eólica bien reputados y pedirles consejo en la compra de anemómetros.

\*) El anemómetro de un aerogenerador realmente sólo se utiliza para determinar si sopla viento suficiente como para que valga la pena orientar el rotor del aerogenerador en contra del viento y ponerlo en marcha.

## **Torres**

### Torres de aerogeneradores



[www.windpower.gob](http://www.windpower.gob)

La torre del aerogenerador soporta la góndola y el rotor. En los grandes aerogeneradores las torres tubulares pueden ser de acero, de celosía o de hormigón. Las torres tubulares tensadas con vientos sólo se utilizan en aerogeneradores pequeños (cargadores de baterías, etc.).

### **Torres tubulares de acero**



[www.windpower.gob](http://www.windpower.gob)

La mayoría de los grandes aerogeneradores se entregan con torres tubulares de acero, fabricadas en secciones de 20-30 metros con bridas en cada uno de los extremos, y son unidas con pernos "in situ". Las torres son tronco-cónicas (es decir, con un diámetro creciente hacia la base), con el fin de aumentar su resistencia y al mismo tiempo ahorrar material.

### **Torres de celosía**

Las torres de celosía son fabricadas utilizando perfiles de acero soldados. La ventaja básica de las torres de celosía es su coste, puesto que una torre de celosía requiere sólo la mitad de material que una torre tubular sin sustentación adicional con la misma rigidez. La principal

desventaja de este tipo de torres es su apariencia visual (aunque esa cuestión es claramente debatible). En cualquier caso, por razones estéticas, las torres de celosía han desaparecido prácticamente en los grandes aerogeneradores modernos.



[www.windpower.gob](http://www.windpower.gob)

### **Torres de mástil tensado con vientos**

Muchos de los aerogeneradores pequeños están contruidos con delgadas torres de mástil sostenidas por cables tensores. La ventaja es el ahorro de peso y, por lo tanto, de coste. Las desventajas son el difícil acceso a las zonas alrededor de la torre, lo que las hace menos apropiadas para zonas agrícolas. Finalmente, este tipo de torres es más propensa a sufrir actos vandálicos, lo que compromete la seguridad del conjunto.



www.windpower.gob

### Soluciones de torres híbridas

Algunas torres están hechas con diferentes combinaciones de las ya mencionadas. Un ejemplo es la torre de tres patas Bonus 95 kW de la fotografía, de la que podría decirse que es un híbrido entre una torre de celosía y una torre tensada con vientos.

### Consideraciones de coste

Generalmente, el precio de la torre de la turbina eólica supone alrededor de un 20 por ciento del coste total de la turbina. Para una torre de unos 50 metros, el coste adicional de otros 10 metros es de unos 15.000 dólares americanos. Por lo tanto, es bastante importante para el coste final de la energía construir las torres de la forma más óptima posible.

### Consideraciones aerodinámicas

Generalmente, es una ventaja disponer de una torre alta en zonas con una elevada rugosidad del terreno, dado que la velocidad del viento aumenta conforme nos

alejamos del suelo, tal y como se vio en la página sobre cizallamiento del viento.

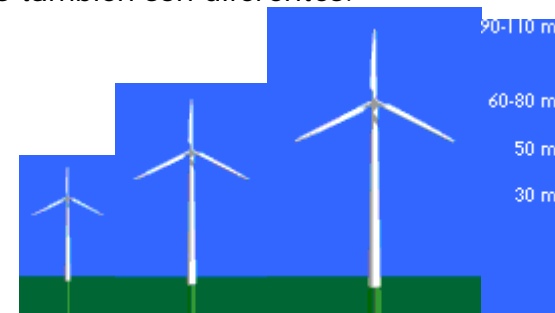
Las torres de celosía y las de mástil tensado con vientos tienen la ventaja de ofrecer menos abrigo que una torre maciza.

### Consideraciones de dinámica estructural

Las palas de rotor de turbinas con torres relativamente cortas estarán sometidas a velocidades de viento muy diferentes (y, por lo tanto, a diferente flexión) cuando la pala se encuentre en su posición más elevada y en su posición más baja, lo que provoca un aumento de las cargas de fatiga en la turbina.

### Elección entre torres altas y bajas

Obviamente, obtendrá más energía de una turbina más grande que de otra pequeña, pero si echa un vistazo a los tres aerogeneradores de abajo, que son de 225 kW, 600 kW y 1500 kW, respectivamente, y con diámetros de rotor de 27, 43 y 60 metros, observará que las alturas de las torres también son diferentes.



www.windpower.gob

1. Claramente, un rotor de 60 metros de diámetro no podrá ser instalado sobre una torre de menos de 30 metros. Pero si consideramos el coste de un gran rotor y un gran generador y multiplicador, sería seguramente un desperdicio instalarlos sobre una torre pequeña, ya que se dispone de velocidades de viento mucho más altas y, por lo tanto, de mucha más energía con una torre alta (ver la sección sobre recursos eólicos ). Cada metro de torre cuesta dinero, por supuesto, por lo que la altura óptima de la torre es función de : Coste por metro de torre (10 metros más de torre le costarán actualmente alrededor de 15.000 dólares americanos).
2. Cuánto varían los vientos locales con la altura sobre el nivel del suelo, es decir, la rugosidad promedio del terreno local (las grandes rugosidades van mejor con una torre alta).
3. El precio que el propietario de la turbina obtiene por un kWh adicional de electricidad.

Los fabricantes suelen servir máquinas donde la altura de la torre es igual al diámetro del rotor. Estéticamente, mucha gente piensa que las turbinas son más agradables

a la vista cuando la altura de la torre es aproximadamente igual al diámetro del rotor. Consideraciones sobre seguridad en el trabajo: La elección de un determinado tipo de torre tiene consecuencias sobre la seguridad en el trabajo: esto es tratado en profundidad en la página sobre seguridad en turbinas eólicas.

### 5.1.1 Aerogeneradores modernos

En la actualidad existe toda una enorme variedad de modelos de aerogeneradores, diferentes entre sí tanto por la potencia proporcionada, como por el número de palas o incluso por la manera de producir energía eléctrica (aisladamente o en conexión directa con la red de distribución convencional). Pueden clasificarse, pues, atendiendo a distintos criterios:

#### 1) Por la posición del aerogenerador:

##### **Eje Vertical**

Su característica principal es que el eje de rotación se encuentra en posición perpendicular al suelo. Son también llamados "VAWTs", que corresponde a las siglas de la denominación inglesa "vertical axis wind turbines". Existen tres tipos de estos aerogeneradores:

##### a.1) Darrieus:

Consisten en dos o tres arcos que giran alrededor del eje.

##### a.2) Panemonas

Cuatro o más semicírculos unidos al eje central. Su rendimiento es bajo.

a.3) Sabonius:

Dos o más filas de semicilindros colocados opuestamente.

### **Eje horizontal**

Son los más habituales y en ellos se ha centrado el mayor esfuerzo de diseño en los últimos años. Se los denomina también "HAWTs", que corresponde a las siglas de la denominación inglesa "horizontal axis wind turbines". Un prototipo de potencia generada 1'5 Mw. Se presenta en la figura.

### **2) Por la posición del equipo con respecto al viento:**

a) A barlovento:

Las máquinas corriente arriba tienen el rotor de cara al viento. La principal ventaja de los diseños corriente arriba es que se evita el abrigo del viento tras la torre. Con mucho la mayoría de los aerogeneradores tienen este diseño.

Por otro lado, también hay algo de abrigo enfrente de la torre, es decir, el viento empieza a desviarse de la torre antes de alcanzarla, incluso si la torre es redonda y lisa. Así pues, cada vez que el rotor pasa por la torre, la potencia del aerogenerador cae ligeramente.

El principal inconveniente de los diseños corriente arriba es que el rotor necesita ser bastante inflexible, y estar situado a una cierta distancia de la torre. Además una

máquina corriente arriba necesita un mecanismo de orientación para mantener el rotor de cara al viento.

b) A sotavento:

Las máquinas corriente abajo tienen el rotor situado en la cara a sotavento de la torre. La ventaja teórica que tienen es que pueden ser contruidos sin un mecanismo de orientación, si el rotor y la góndola tienen un diseño apropiado que hace que la góndola siga al viento pasivamente.

Sin embargo, en grandes máquinas ésta es una ventaja algo dudosa, pues se necesitan cables para conducir la corriente fuera del generador. Si la máquina ha estado orientándose de forma pasiva en la misma dirección durante un largo periodo de tiempo y no dispone de un mecanismo de orientación, los cables pueden llegar a sufrir una torsión excesiva.

Un aspecto más importante es que el rotor puede hacerse más flexible. Esto supone una ventaja tanto en cuestión de peso como de dinámica de potencia de la máquina, es decir, las palas se curvarán a altas velocidades del viento, con lo que quitarán parte de la carga a la torre.

El inconveniente principal es la fluctuación de la potencia eólica, debida al paso del rotor a través del abrigo de la torre. Esto puede crear más cargas de fatiga en la turbina que con un diseño corriente arriba.

### **Por el número de palas:**

a) Una pala

Al tener sólo una pala estos aerogeneradores precisan un contrapeso en el otro extremo para equilibrar. La velocidad de giro es muy elevada. Su gran inconveniente es que introducen en el eje unos esfuerzos muy variables, lo que acorta la vida de la instalación.

Una aplicación de este tipo de máquinas puede verse en la foto situada al lado.

#### b) Dos palas

Los diseños bipala de aerogeneradores tienen la ventaja de ahorrar el coste de una pala y, por supuesto, su peso. Sin embargo, suelen tener dificultades para penetrar en el mercado, en parte porque necesitan una mayor velocidad de giro para producir la misma energía de salida. Esto supone una desventaja tanto en lo que respecta al ruido como al aspecto visual.

Una aplicación de este diseño se presenta en la figura.

#### c) Tres palas

La mayoría de los aerogeneradores modernos tienen este diseño, con el rotor mantenido en la posición corriente arriba, usando motores eléctricos en sus mecanismos de orientación. Este diseño tiende a imponerse como estándar al resto de los conceptos evaluados. La gran mayoría de las turbinas vendidas en los mercados mundiales poseen este diseño.

Un espectacular ejemplo de 72 m de diámetro del rotor y 80 m de altura hasta el eje puede verse en la foto .

#### d) Multipalas

Con un número superior de palas o multipalas. Se trata del llamado modelo americano, debido a que una de sus primeras aplicaciones fue la extracción de agua en pozos de las grandes llanuras de aquel continente.

#### **Por la manera de adecuar la orientación del equipo a la dirección del viento en cada momento:**

El mecanismo de orientación de un aerogenerador es utilizado para girar el rotor de la turbina en contra del viento. Se dice que la turbina tiene un error de orientación si el rotor no está perpendicular al viento.

Un error de orientación implica que una menor proporción de la energía del viento pasará a través del área del rotor (esta proporción disminuirá con el coseno del error de orientación) Por tanto, la eficiencia del mecanismo de orientación es fundamental para mantener el rendimiento de la instalación.

### 5.1.2 Como se instalan?



[www.windpower.gob](http://www.windpower.gob)

La cimentación se cuela en hormigón, Pero primero, tienes que excavar un gran agujero en el suelo. Se dispone un enrejado de hierro para mantener el hormigón en su sitio.



[www.windpower.gob](http://www.windpower.gob)

Alrededor de la cimentación se coloca un cable de cobre sin aislamiento. Esto es el conductor de puesta a tierra. En caso de que le caiga un rayo al aerogenerador, la electricidad será conducida mediante cables hacia abajo a través de la torre y vertida a tierra. De esta manera el rayo no daña al aerogenerador.



[www.windpower.gob](http://www.windpower.gob)

El hormigón llega en un camión. Es conducido hasta el agujero a través de una larga manguera. Los tres hombres se aseguran de que el hormigón se dispone correctamente. Uno de ellos sostiene la manguera. El otro tiene un vibrador que compacta el hormigón. El tercer hombre está ocupado alisando la superficie. El hormigón está hecho de gravilla, arena, cemento y agua.



[www.windpower.gob](http://www.windpower.gob)

La parte inferior de la torre se cuela dentro del hormigón. Ahora ya están listos para colocar el resto de la torre encima.



www.windpower.gob

1) Antes de montar el aerogenerador, la torre, la góndola y el rotor son transportados en grandes camiones. Si se trata de un aerogenerador muy alto las partes pueden ser tan grandes que puedes tener que transportarlas durante la noche para no interrumpir el tráfico.



www.windpower.gob

2) El rotor se monta en el sitio.

Una grúa grande puede levantar cosas pesadas a una altura de 50 metros. Esta torre tiene 45 metros de alto y será montada a partir de dos secciones. Querrás asegurarte de que las secciones están convenientemente aseguradas. Por eso se atornillan juntas.



www.windpower.gob

3) La grúa puede trabajar con una gran precisión.

Para hacer que las dos secciones de la torre encajen exactamente, a menudo el conductor de la grúa tiene que mover la grúa ¡sólo uno o dos milímetros!

Si hace demasiado viento es difícil llevar las secciones a su sitio.





www.windpower.gob

**4)** Cuando se está colocando la góndola sobre la torre, el hombre tiene que aguantarla con una cuerda.

De esta manera, puede llevar la góndola exactamente al sitio correcto sobre la torre. El hombre dispone de un enlace radiofónico a algunos de los hombres que están en el interior de la torre.



www.windpower.gob

**5)** El rotor puede ser difícil de controlar. Esta es la razón por la cual cada uno de los hombres tiene que sujetar una pala con una cuerda. En este punto es muy importante que no haga demasiado viento.



www.windpower.gob

**6)** El rotor es colocado en la góndola. Esto puede resultar un tanto complicado si el rotor no se sitúa exactamente en frente de la góndola. Los dos hombres del suelo ayudan a llevarlo a la posición correcta



www.windpower.gob

**7)** Ahora el aerogenerador está casi acabado. Sin embargo, tiene que ser conectado a la red eléctrica de forma que la electricidad puede llegar a los consumidores. El aerogenerador también tiene que ser revisado para asegurarse de que todo está en orden. Pero una vez que ha sido instalado, el aerogenerador puede producir electricidad durante 20-25 años.

### **5.1.3 Selección del emplazamiento**



www.windpower.gob

### **Condiciones eólicas**

Normalmente, el sólo hecho de observar la naturaleza resulta de excelente ayuda a la hora de encontrar un emplazamiento apropiado para el aerogenerador.

Los árboles y matorrales de la zona serán una buena pista para saber cual es la dirección de viento dominante, como puede verse en la fotografía de la izquierda

Si nos movemos a lo largo de un litoral accidentado, observaremos que siglos de erosión han trabajado en una dirección en particular.

Los datos meteorológicos, obtenidos en forma de rosa de los vientos durante un plazo de 30 años, sean probablemente su mejor guía, aunque rara vez estos datos son recogidos directamente en su emplazamiento, por lo que hay que ser muy prudente al utilizarlos, tal y como se verá en la próxima sección. Si ya existen aerogeneradores en ese área, sus resultados de producción son una excelente guía de las condiciones de viento locales. En países como Dinamarca y Alemania, en los que a menudo se encuentra un gran número de aerogeneradores dispersos por el campo, los fabricantes pueden ofrecer resultados de producción garantizados

basándose en cálculos eólicos realizados en el emplazamiento.

### **Buscar una perspectiva**

De lo que hemos aprendido en las páginas anteriores, nos gustaría tener una vista lo más amplia posible en la dirección de viento dominante, así como los mínimos obstáculos y una rugosidad lo más baja posible en dicha dirección. Si puede encontrar una colina redondeada para situar las turbinas, es posible incluso que consiga además un efecto acelerador.

### **Rugosidad y cizallamiento del viento**

A una gran altura de la superficie del suelo, alrededor de un kilómetro, la superficie terrestre apenas ejerce influencia alguna sobre el viento. Sin embargo, en las capas más bajas de la atmósfera, las velocidades del viento se ven afectadas por la fricción con la superficie terrestre. En la industria eólica se distingue entre rugosidad del terreno, la influencia de los obstáculos, y la influencia del contorno del terreno, también llamada orografía del área. Trataremos de la orografía cuando investigamos los llamados efectos aceleradores, a saber, el efecto túnel y el efecto de la colina.

### **Rugosidad**

En general, cuanto más pronunciada sea la rugosidad del terreno mayor será la ralentización que experimente el viento.

Obviamente, los bosques y las grandes ciudades ralentizan mucho el viento, mientras que las pistas de hormigón de los aeropuertos sólo lo ralentizan ligeramente. Las superficies de agua son incluso más lisas que las pistas de hormigón, y tendrán por tanto menos influencia sobre el viento, mientras que la hierba alta y los arbustos ralentizan el viento de forma considerable.

### **Clase de rugosidad y longitud de rugosidad**

En la industria eólica, la gente suele referirse a clase de rugosidad o longitud de rugosidad cuando se trata de evaluar las condiciones eólicas de un paisaje. Una alta rugosidad de clase 3 ó 4 se refiere a un paisaje con muchos árboles y edificios, mientras que a la superficie del mar le corresponde una rugosidad de clase 0.

Las pistas de hormigón de los aeropuertos pertenecen a la clase de rugosidad 0.5, al igual que el paisaje abierto y llano pacido por las ovejas (fotografía de la izquierda). La definición exacta de clase de rugosidad y longitud de rugosidad puede ser encontrada en el manual de

referencia. El término longitud de rugosidad es en realidad la distancia sobre el nivel del suelo a la que teóricamente la velocidad del viento debería ser nula.

### Efecto tunel



www.windpower.gob

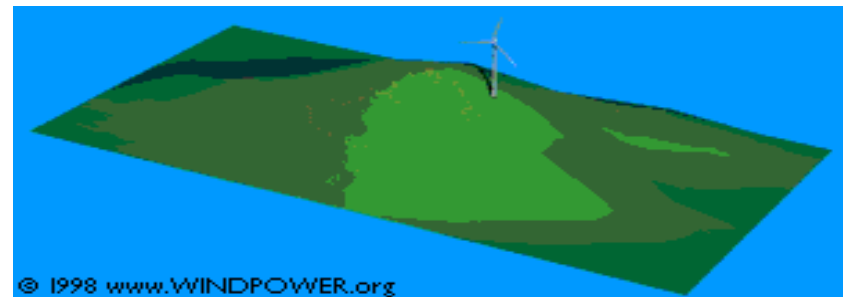
Si toma un camino entre dos edificios altos o en un paso estrecho entre montañas observará que se da el mismo efecto: el aire se comprime en la parte de los edificios o de la montaña que está expuesta al viento, y su velocidad crece considerablemente entre los obstáculos del viento. Esto es lo que se conoce como "efecto túnel". Así pues, incluso si la velocidad normal del viento en un terreno abierto puede ser de, digamos, 6 metros por segundo, en un "túnel" natural puede fácilmente alcanzar los 9 metros por segundo.

Situar un aerogenerador en un túnel de este tipo es una forma inteligente de obtener velocidades del viento superiores a las de las áreas colindantes.

Para obtener un buen efecto túnel el túnel debe estar "suavemente" enclavado en el paisaje. En el caso de que las colinas sean muy accidentadas, puede haber muchas turbulencias en ese área, es decir, el viento soplará en muchas direcciones diferentes (y con cambios muy rápidos).

Si hay muchas turbulencias, la ventaja que supone la mayor velocidad del viento se verá completamente anulada, y los cambios en el viento pueden causar roturas y desgastes innecesarios en el aerogenerador.

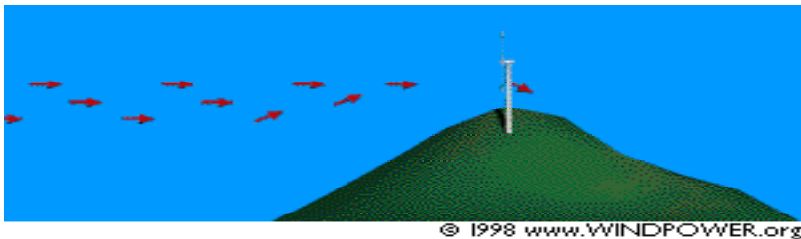
### Efecto de la colina



www.windpower.gob

Una forma corriente de emplazar aerogeneradores es situándolos en colinas o estribaciones dominando el paisaje circundante. En particular, siempre supone una ventaja tener una vista lo más amplia posible en la dirección del viento dominante en el área.

En las colinas, siempre se aprecian velocidades de viento superiores a las de las áreas circundantes. Una vez más, esto es debido a que el viento es comprimido en la parte de la montaña que da al viento, y una vez el aire alcanza la cima de la colina puede volver a expandirse al descender hacia la zona de bajas presiones por la ladera a sotavento de la colina.



Tal y como puede observar en el dibujo, el viento empieza a inclinarse algún tiempo antes de alcanzar la colina, debido a que en realidad la zona de altas presiones se extiende hasta una distancia considerable enfrente de la colina.

También se dará cuenta de que el viento se hace muy irregular una vez pasa a través del rotor del aerogenerador.

Al igual que ocurría anteriormente, si la colina es escarpada o tiene una superficie accidentada, puede haber una cantidad de turbulencias significativa, que puede anular la ventaja que supone tener unas velocidades de viento mayores.

### **Turbulencia**

Seguramente ya habrá observado que las tormentas suelen venir asociadas a ráfagas de viento que cambian tanto en velocidad como en dirección.

En áreas cuya superficie es muy accidentada y tras obstáculos como edificios, también se producen muchas turbulencias, con flujos de aire muy irregulares, con remolinos y vórtices en los alrededores.

En la imagen puede verse un ejemplo de como la turbulencia aumenta las fluctuaciones en la velocidad del viento (puede compararla con la gráfica de la página anterior).

Las turbulencias disminuyen la posibilidad de utilizar la energía del viento de forma efectiva en un aerogenerador. También provocan mayores roturas y

desgastes en la turbina eólica, tal y como se explica en la sección sobre cargas de fatiga. Las torres de aerogeneradores suelen construirse lo suficientemente altas como para evitar las turbulencias del viento cerca del nivel del suelo.

### **Conexión a la red**

Obviamente, los grandes aerogeneradores tienen que ser conectados a la red eléctrica.

Para los proyectos de menores dimensiones es fundamental que haya una línea de alta tensión de 10 - 30 kV relativamente cerca para que los costes de cableado no sean prohibitivamente altos (por supuesto, esto preocupa sobremanera a aquellos que tienen que pagar la extensión de la línea de alta tensión).

Los generadores de las grandes turbinas eólicas modernas generalmente producen la electricidad a 690 V. Un transformador colocado cerca de la turbina o dentro de la torre de la turbina convierte la electricidad en alta tensión (normalmente hasta 10 - 30 kV).

### **Refuerzo de red**

La red eléctrica próxima al(a los) aerogenerador(es) deberá ser capaz de recibir la electricidad proveniente de la turbina. Si ya hay muchas turbinas conectadas a la red, la red puede necesitar refuerzo, es decir, un cable

más grande, conectado quizás más cerca de una estación de transformación de más alto voltaje.

### **Condiciones del suelo**

La viabilidad tanto de realizar las cimentaciones de las turbinas como de construir carreteras que permitan la llegada de camiones pesados hasta el emplazamiento deben tenerse en cuenta en cualquier proyecto de aerogenerador.

### **Riesgos en el uso de datos meteorológicos**

Los meteorólogos ya recogen datos de viento para sus previsiones meteorológicas y para aviación, y esa información es a menudo utilizada para la evaluación de las condiciones de viento generales para energía eólica en una área determinada.

Sin embargo, aunque para las previsiones meteorológicas no es tan importante realizar medidas precisas de la velocidad del viento, y por tanto de la energía del viento, sí que lo es para la elaboración de planes eólicos. Las velocidades del viento son fuertemente influenciadas por la rugosidad de la superficie del área circundante, por los obstáculos cercanos (como árboles, faros u otras construcciones) y por los alrededores del terreno local.

A menos de que haga cálculos que compensen las condiciones locales en las que las medidas fueron hechas,

es difícil estimar las condiciones eólicas en un emplazamiento cercano. En la mayoría de los casos, la utilización directa de datos meteorológicos infraestimarán el potencial eólico real del área.

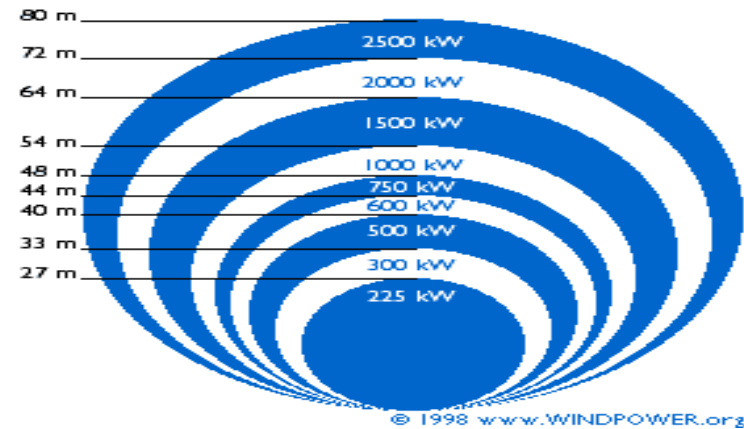
## 5.2 Tamaños y posiciones convenientes del rotor



[www.windpower.gob](http://www.windpower.gob)

### La potencia producida aumenta con el área de barrido del rotor

Cuando un agricultor habla de la extensión de tierra que está cultivando normalmente lo hará en términos de hectáreas o de acres. Lo mismo ocurre con los aerogeneradores, aunque en el caso del cultivo eólico se cultiva un área vertical en lugar de una horizontal.



El área del disco cubierto por el rotor (y, por supuesto, las velocidades del viento) determina cuanta energía podemos coleccionar en un año.

El dibujo le dará una idea de los tamaños de rotor normales en aerogeneradores: una típica turbina con un generador eléctrico de 600 kW suele tener un rotor de unos 44 metros. Si dobla el diámetro del rotor, obtendrá un área cuatro veces mayor (dos al cuadrado). Esto significa que también obtendrá del rotor una potencia disponible cuatro veces mayor. Los diámetros de rotor pueden variar algo respecto a las cifras dadas arriba, ya que muchos de los fabricantes optimizan sus máquinas ajustándolas a las condiciones de viento locales: por supuesto, un gran generador requiere más potencia (es decir, vientos fuertes) sólo para poder girar. Por lo tanto,

si instala un aerogenerador en un área de vientos suaves realmente maximizará la producción anual utilizando un generador bastante pequeño para un tamaño de rotor determinado (o un tamaño de rotor más grande para un generador dado). Para una máquina de 600 kW, los tamaños de rotor pueden variar entre 39 a 48 m. La razón por la que, en zonas de vientos suaves, se puede obtener una mayor producción de un generador relativamente más pequeño es que la turbina estará funcionando durante más horas a lo largo del año.

### **Razones para elegir grandes turbinas**

1. Existen economías de escala en las turbinas eólicas, es decir, las máquinas más grandes son capaces de suministrar electricidad a un coste más bajo que las máquinas más pequeñas. La razón es que los costes de las cimentaciones, la construcción de carreteras, la conexión a la red eléctrica, además de otros componentes en la turbina (el sistema de control electrónico, etc.), son más o menos independientes del tamaño de la máquina.

2. Las máquinas más grandes están particularmente bien adaptadas para la energía eólica en el mar. Los costes de las cimentaciones no crecen en proporción con el tamaño de la máquina, y los costes de mantenimiento son ampliamente independientes del tamaño de la máquina.
3. En áreas en las que resulta difícil encontrar emplazamientos para más de una única turbina, una gran turbina con una torre alta utiliza los recursos eólicos existentes de manera más eficiente.

### **Razones para elegir turbinas más pequeñas**

4. La red eléctrica local puede ser demasiado débil para manipular la producción de energía de una gran máquina. Este puede ser el caso de las partes remotas de la red eléctrica, con una baja densidad de población y poco consumo de electricidad en el área.
5. Hay menos fluctuación en la electricidad de salida de un parque eólico compuesto de varias máquinas pequeñas, pues las fluctuaciones de viento raras veces ocurren y , por lo tanto, tienden



a cancelarse. Una vez más, las máquinas más pequeñas pueden ser una ventaja en una red eléctrica débil.

6. El coste de usar grandes grúas, y de construir carreteras lo suficientemente fuertes para transportar los componentes de la turbina, puede hacer que en algunas áreas las máquinas más pequeñas resulten más económicas.
7. Con varias máquinas más pequeñas el riesgo se reparte, en caso de fallo temporal de la máquina (p.ej. si cae un rayo).
8. Consideraciones estéticas en relación al paisaje pueden a veces imponer el uso de máquinas más pequeñas. Sin embargo, las máquinas más grandes suelen tener una velocidad de rotación más pequeña, lo que significa que realmente una máquina grande no llama tanto la atención como muchos rotores pequeños moviéndose rápidamente.

### 5.3 Tamaños de torres y materiales convenientes



[www.windpower.gob](http://www.windpower.gob)

La torre del aerogenerador soporta la góndola y el rotor. En los grandes aerogeneradores las torres tubulares pueden ser de acero, de celosía o de hormigón. Las torres tubulares tensadas con vientos sólo se utilizan en aerogeneradores pequeños (cargadores de baterías, etc.).

#### Torres tubulares de acero



[www.windpower.gob](http://www.windpower.gob)

La mayoría de los grandes aerogeneradores se entregan con torres tubulares de acero, fabricadas en secciones de 20-30 metros con bridas en cada uno de los extremos, y son unidas con pernos "in situ". Las torres son tronco-cónicas (es decir, con un diámetro creciente hacia la base), con el fin de aumentar su resistencia y al mismo tiempo ahorrar material

### Torres de celosía



[www.windpower.gob](http://www.windpower.gob)

Las torres de celosía son fabricadas utilizando perfiles de acero soldados. La ventaja básica de las torres de celosía es su coste, puesto que una torre de celosía requiere sólo la mitad de material que una torre tubular sin

sustentación adicional con la misma rigidez. La principal desventaja de este tipo de torres es su apariencia visual (aunque esa cuestión es claramente debatible). En cualquier caso, por razones estéticas, las torres de celosía han desaparecido prácticamente en los grandes aerogeneradores modernos.

### Torres de mástil tensado con vientos



[www.windpower.gob](http://www.windpower.gob)

Muchos de los aerogeneradores pequeños están contruidos con delgadas torres de mástil sostenidas por cables tensores. La ventaja es el ahorro de peso y, por lo tanto, de coste. Las desventajas son el difícil acceso a las

zonas alrededor de la torre, lo que las hace menos apropiadas para zonas agrícolas. Finalmente, este tipo de torres es más propensa a sufrir actos vandálicos, lo que compromete la seguridad del conjunto.

### **Soluciones de torres híbridas**



[www.windpower.gob](http://www.windpower.gob)

Algunas torres están hechas con diferentes combinaciones de las ya mencionadas. Un ejemplo es la torre de tres patas Bonus 95 kW de la fotografía, de la que podría decirse que es un híbrido entre una torre de celosía y una torre tensada con vientos.

### **Consideraciones de coste**

Generalmente, el precio de la torre de la turbina eólica supone alrededor de un 20 por ciento del coste total de la turbina. Para una torre de unos 50 metros, el coste adicional de otros 10 metros es de unos 15.000 dólares americanos. Por lo tanto, es bastante importante para el coste final de la energía construir las torres de la forma más óptima posible.

### **Consideraciones aerodinámicas**

Generalmente, es una ventaja disponer de una torre alta en zonas con una elevada rugosidad del terreno, dado que la velocidad del viento aumenta conforme nos alejamos del suelo, tal y como se vio en la página sobre cizallamiento del viento.

Las torres de celosía y las de mástil tensado con vientos tienen la ventaja de ofrecer menos abrigo que una torre maciza.

### **Consideraciones de dinámica estructural**

Las palas de rotor de turbinas con torres relativamente cortas estarán sometidas a velocidades de viento muy diferentes (y, por lo tanto, a diferente flexión) cuando la pala se encuentre en su posición más elevada y en su posición más baja, lo que provoca un aumento de las cargas de fatiga en la turbina.

### Elección entre torres altas y bajas

Obviamente, obtendrá más energía de una turbina más grande que de otra pequeña, pero si echa un vistazo a los tres aerogeneradores de abajo, que son de 225 kW, 600 kW y 1500 kW, respectivamente, y con diámetros de rotor de 27, 43 y 60 metros, observará que las alturas de las torres también son diferentes.

Claramente, un rotor de 60 metros de diámetro no podrá ser instalado sobre una torre de menos de 30 metros. Pero si consideramos el coste de un gran rotor y un gran generador y multiplicador, sería seguramente un desperdicio instalarlos sobre una torre pequeña, ya que se dispone de velocidades de viento mucho más altas y, por lo tanto, de mucha más energía con una torre alta. Cada metro de torre cuesta dinero, por supuesto, por lo que la altura óptima de la torre es función de:

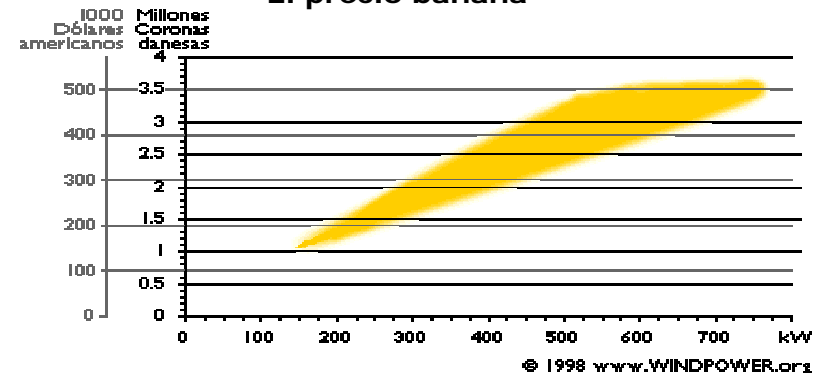
1. Coste por metro de torre (10 metros más de torre le costarán actualmente alrededor de 15.000 dólares americanos).
2. Cuánto varían los vientos locales con la altura sobre el nivel del suelo, es decir, la rugosidad promedio del terreno local (las grandes rugosidades van mejor con una torre alta).

3. El precio que el propietario de la turbina obtiene por un kWh adicional de electricidad.

Los fabricantes suelen servir máquinas donde la altura de la torre es igual al diámetro del rotor. Estéticamente, mucha gente piensa que las turbinas son más agradables a la vista cuando la altura de la torre es aproximadamente igual al diámetro del rotor.

## VI. BENEFICIOS PARA LA ECONOMÍA

### ¿Cuánto cuesta un aerogenerador? El precio banana



El gráfico de arriba da una idea del rango de precios de los aerogeneradores daneses modernos conectados a red, en febrero de 1998. Como puede ver, los precios varían para cada tamaño de aerogenerador. Los motivos son, p.ej., las diferentes alturas de las torres y los

diferentes diámetros de rotor. Un metro extra de torre le costará aproximadamente 1.500 dólares americanos. Una máquina especial para vientos suaves con un diámetro de rotor relativamente grande será más cara que una máquina para vientos fuertes con un diámetro de rotor pequeño.

### **Economías de escala**

Al cambiar de una máquina de 150 kW a otra de 600 kW los precios más o menos se triplicarán, en lugar de cuadruplicarse. La razón es que hasta cierto punto existen economías de escala, p.ej. la cantidad de mano de obra que participa en la construcción de una máquina de 150 kW no es muy diferente de la que hace falta para construir una máquina de 600 kW. P.ej. las características de seguridad, la cantidad de electrónica necesaria para hacer funcionar una máquina pequeña o una grande es aproximadamente la misma. También puede haber (algunas) economías de escala en la operación de parques eólicos en lugar de operar turbinas individuales, aunque estas economías tienden a ser bastante limitadas.

### **Competencia de precios y gama de productos**

Actualmente la competencia de precios es particularmente dura, y la gama de productos

particularmente amplia alrededor de 1000 kW. Aquí es donde probablemente va a encontrar una máquina optimizada para cualquier clima eólico en particular.

### **Máquinas típicas de 1000 kW en el mercado actual**

Incluso si los precios son muy similares en el rango de 600 a 750 kW, no tiene necesariamente que elegir una máquina con un generador lo más grande posible. Una máquina con un gran generador de 750 kW (y un diámetro de rotor relativamente pequeño) puede generar menos electricidad que otra de, digamos, 600 kW, si está situada en una zona de vientos suaves. Hoy en día el caballo de carga es típicamente una máquina de 1000 kW con una altura de torre de 60 a 80 metros y un diámetro de rotor de alrededor de 54 metros.

### **1000 dólares por kW en promedio**

El precio medio para los grandes parques eólicos modernos está alrededor de 1.000 dólares americanos por kilovatio de potencia eléctrica instalada. (Observe que aún no estamos hablando de producción de energía. Volveremos sobre esto en un par de páginas. La producción de energía se mide en kilovatios-hora.

Para turbinas individuales o pequeños grupos de turbinas, los costes estarán normalmente algo por encima.

## Costes de instalación de aerogeneradores



[www.windpower.gov](http://www.windpower.gov)

Los costes de instalación incluyen las cimentaciones, normalmente hechas de hormigón armado, la construcción de carreteras (necesarias para transportar la turbina y las secciones de la torre hasta el lugar de la construcción), un transformador (necesario para convertir la corriente a baja tensión (690 V) de la turbina a una corriente a 10-30 kV para la red eléctrica local), conexión telefónica para el control remoto y vigilancia de la turbina, y los costes de cableado, es decir, el cable que va desde la turbina hasta la línea de alta tensión de 10-30 kV.

## Los costes de instalación varían

Obviamente, los costes de las carreteras y de las cimentaciones dependen de las condiciones del suelo, es decir, de como de barato y fácil sea construir una carretera capaz de soportar camiones de 30 toneladas. Otro factor variable es la distancia a la carretera ordinaria más cercana, los costes de llevar una grúa móvil hasta el sitio, y la distancia a una línea de alta tensión capaz de manejar la producción de energía máxima de la turbina. La conexión telefónica y el control remoto no es una necesidad, pero a menudo es bastante barato, por lo que resulta económico incluirlo en la instalación de una turbina. Los costes de transporte de la turbina pueden entrar en los cálculos, si el emplazamiento es muy remoto, aunque normalmente no son superiores a unos 15.000 dólares americanos.

## Economías de escala

Obviamente es más barato conectar muchas turbinas en la misma localización que conectar una sola. Por otra parte, hay limitaciones a la cantidad de energía eléctrica que la red local puede aceptar. Si la red eléctrica es demasiado débil para manejar la producción de la turbina, puede ser necesario un refuerzo de red, es decir, una extensión de la red eléctrica de alta tensión. Quién

debe pagar por el refuerzo de red (si el propietario de la turbina o la compañía eléctrica) varía de un país a otro.

### **Costes de operación y de mantenimiento en aerogeneradores**

Los modernos aerogeneradores están diseñados para trabajar alrededor de 120.000 horas de operación a lo largo de su tiempo de vida de diseño de 20 años. Esto supone mucho más que un motor de automóvil, que dura generalmente alrededor de 4.000 a 6.000 horas.

### **Costes de operación y mantenimiento**

La experiencia muestra que los costes de mantenimiento son generalmente muy bajos cuando las turbinas son completamente nuevas, pero que aumentan algo conforme la turbina va envejeciendo.

Estudios llevados a cabo en 500 aerogeneradores daneses instalados en Dinamarca desde 1975 muestran que las nuevas generaciones de turbinas tienen relativamente menos costes de reparación y mantenimiento que las generaciones más viejas (los estudios comparan turbinas que tienen la misma edad pero que pertenecen a distintas generaciones).

Los aerogeneradores daneses más antiguos (25-150 kW) tienen costes de reparación y mantenimiento de una media de alrededor del 3 por ciento de inversión inicial de

la turbina. Las turbinas más nuevas son en promedio sustancialmente más grandes, lo que tendería a disminuir los costes de mantenimiento por kW de potencia instalada (no necesita revisar una gran turbina moderna más a menudo que otra pequeña). Para las máquinas más nuevas los rangos estimados son del 1,5 al 2 por ciento al año de la inversión inicial de la turbina.

La mayoría de costes de mantenimiento son una cantidad anual fija para el mantenimiento regular de las turbinas, aunque algunos prefieren utilizar en sus cálculos una cantidad fija por kWh producido, normalmente alrededor de 0,01 dólares americanos/kWh. El razonamiento sobre el que se apoya este método es que el desgaste y la rotura en la turbina generalmente aumentan con el aumento de la producción.

### **Economías de escala**

Además de las economías de escala, mencionadas arriba, que varían con el tamaño de la turbina, pueden haber economías de escala en la operación de parques eólicos en lugar de turbinas individuales. Estas economías se refieren a visitas de mantenimiento cada seis meses, vigilancia y administración, etc.

### **Reinversión en la turbina (reacondicionamiento, revisión general)**

Algunos componentes del aerogenerador están más sujetos que otros al desgaste y a la rotura. Esto es particularmente cierto para las palas y para el multiplicador. Los propietarios de aerogeneradores que ven que el final de la vida de diseño de su turbina está cerca, pueden encontrar ventajoso alargar la vida de la turbina haciendo una revisión general de la turbina, p.ej. reemplazando las palas del rotor. El precio de un juego nuevo de palas, un multiplicador o un generador suele ser del orden de magnitud del 15-20 por ciento del precio de la turbina.

### **Tiempo de vida de proyecto, vida de diseño**

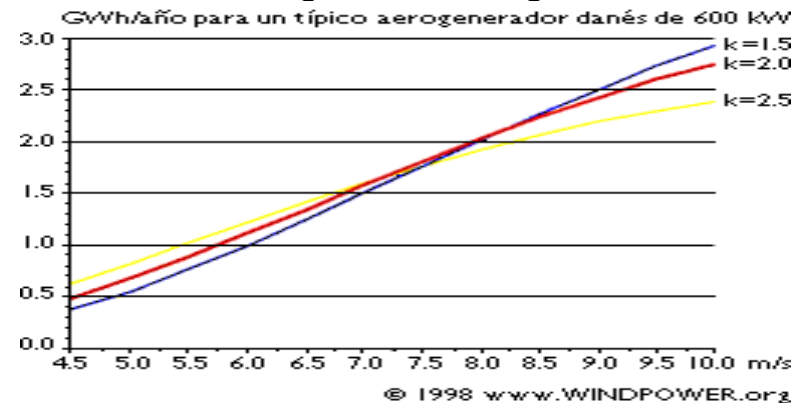
Los componentes de los aerogeneradores daneses están diseñados para durar 20 años. Evidentemente, se podría diseñar alguno de los componentes para que durase más tiempo, aunque realmente sería un desperdicio si otros componentes principales fueran a averiarse más pronto.

La vida de diseño de 20 años es un compromiso económico útil, que se utiliza para guiar a los ingenieros que desarrollan los componentes para las turbinas. Sus ensayos tienen que demostrar que sus componentes tienen una probabilidad de fallo muy baja antes de que

hayan transcurrido 20 años. La vida real de un aerogenerador depende tanto de la calidad de la turbina como de las condiciones climáticas locales, es decir, de la cantidad de turbulencias del emplazamiento, tal como se explicó en la página sobre el diseño de la turbina y las cargas de fatiga. Por ejemplo, las turbinas marinas pueden durar más debido a la baja turbulencia en el mar.

## **6.1 INGRESOS Y TARIFAS**

### **Producción de energía en un aerogenerador**



El gráfico muestra como la producción de energía anual (en millones de kWh) varía con la intensidad del viento de la localización. Con una velocidad de viento media de, digamos, 6'75 m/s a la altura del buje, obtendrá alrededor de 1,5 millones de kWh de energía anuales.



Como puede ver, la producción de energía anual varía aproximadamente con el cubo de la velocidad del viento a la altura del buje. Cómo de sensible es la producción de energía respecto a la velocidad del viento varía con la distribución de probabilidad del viento, como se explicó en la página sobre la distribución de Weibull. En este gráfico tenemos tres ejemplos con diferentes valores de  $k$  (factores de forma). En nuestro ejemplo trabajaremos con la curva roja ( $k=2$ ).

### **Factor de disponibilidad**

Las cifras de producción de energía anual consideran que los aerogeneradores están en condiciones de servicio y preparados para girar todo el tiempo. Sin embargo, en la práctica, los aerogeneradores necesitan reparación e inspección una vez cada seis meses para asegurar que siguen siendo seguros. Además, las averías de componentes y los accidentes (fallos de suministro eléctrico) pueden inutilizar los aerogeneradores.

Estadísticas muy extensas muestran que los fabricantes alcanzan, en consecuencia, factores de disponibilidad de alrededor del 98 por ciento, es decir, las máquinas están preparadas para funcionar más del 98 por ciento del tiempo. La producción de energía total se ve

generalmente afectada en menos de un 2 por ciento, dado que los aerogeneradores nunca están en funcionamiento durante los vientos fuertes.

Un grado tan alto de fiabilidad es extraordinario, comparado con otros tipos de maquinaria, incluyendo otras tecnologías de generación de electricidad. Así pues, el factor de disponibilidad suele ignorarse en los cálculos económicos, dado que hay otras incertidumbres (p.ej. la variabilidad del viento) que son mucho mayores. Sin embargo, no todos los fabricantes del mundo tienen un buen registro de fiabilidad, por lo que siempre es una buena idea revisar el historial de los fabricantes y la capacidad de servicio antes de salir y comprar un nuevo aerogenerador.

### **Tarifas eléctricas**

Esta página es importante para los inversores en energía eólica privados, pero no para las compañías eléctricas, que por supuesto ya lo conocen todo sobre su propio sistema de tarifas. Generalmente las compañías eléctricas están más interesadas en comprar electricidad durante las horas de picos de carga (máximo consumo) de la red eléctrica, pues de esta forma se ahorran la utilización de electricidad de unidades generadoras

menos eficientes. De acuerdo con un estudio sobre los costes y beneficios sociales de la energía eólica realizado por el instituto danés AKF, la electricidad eólica puede ser de un 30 a un 40 por ciento más valiosa para la red que si se produjera de forma totalmente aleatoria.

En algunas áreas, las compañías eléctricas aplican tarifas eléctricas distintas dependiendo de la hora del día, cuando compran la energía eléctrica de los propietarios privados de aerogeneradores. Normalmente, los propietarios de aerogeneradores reciben menos del precio normal de la electricidad para el consumidor, pues ese precio suele incluir el pago a la compañía eléctrica por los costes de operación y mantenimiento de la red eléctrica, además de sus beneficios.

### **Crédito medioambiental**

Muchos gobiernos y compañías eléctricas en el mundo quieren promover el uso de fuentes de energía renovables. Por lo tanto, ofrecen una prima medioambiental a la energía eléctrica, p.ej. en forma de devolución de tasas eléctricas etc. sobre las tasas normales pagadas por el suministro de energía a la red.

### **Crédito de capacidad**

Para entender el concepto de crédito de capacidad, echemos un vistazo a su opuesto, tarifas de potencia:

Los grandes consumidores de electricidad suelen pagar tanto por la cantidad de energía (kWh) que consumen como por la máxima cantidad de potencia que obtienen de la red, es decir, los consumidores que quieren obtener una gran cantidad de energía muy rápidamente deben pagar más. La razón de ello es que obligan a la compañía eléctrica a tener una mayor capacidad de generación total disponible (mayor potencia de planta).

Las compañías eléctricas tienen que considerar añadir capacidad de generación cuando le proporcionan acceso a red a un nuevo consumidor. Pero con un número modesto de aerogeneradores en la red, los aerogeneradores son casi como "consumidores negativos", como se explica en la sección sobre aerogeneradores en la red eléctrica : posponen la necesidad de instalar otra nueva capacidad generadora.

Así pues, muchas compañías eléctricas pagan una cierta cantidad anual a los propietarios de aerogeneradores en concepto de crédito de capacidad. El nivel exacto de crédito de capacidad varía. En algunos países se paga en función de un número de mediciones de la potencia producida durante el año. En otras áreas, se utiliza algún tipo de fórmula. Finalmente, en diversas áreas no se

proporciona ningún tipo de crédito de capacidad, pues se considera como una parte de la tarifa de energía. En cualquier caso, el crédito de capacidad es una cantidad por año bastante modesta.

### **Costes de potencia reactiva**

La mayoría de aerogeneradores están equipados con los denominados generadores asíncronos, también llamados generadores de inducción. Estos generadores necesitan corriente de la red eléctrica para crear un campo magnético dentro del generador con el fin de funcionar. Como resultado, la corriente alterna de la red eléctrica cercana a la turbina se verá afectada (desplazamiento de fase). En algunos casos esto puede hacer que disminuya (aunque en algunos casos aumenta) la eficiencia de la transmisión de electricidad en la red vecina, debido al consumo de potencia reactiva.

En casi todo el mundo las compañías eléctricas exigen que los aerogeneradores estén equipados con una batería de condensadores eléctricos conmutables, que compensan parcialmente este fenómeno (por razones técnicas no quieren una compensación total). Si la turbina no cumple las especificaciones de la compañía

eléctrica, el propietario puede tener que pagar cargos adicionales.

Normalmente, este no es un problema que preocupe a los propietarios de aerogeneradores, ya que los fabricantes experimentados suministran por rutina de acuerdo con las especificaciones de la compañía eléctrica local.

## **6.2 INVERSIONES: RENTABILIDAD SOCIAL**

### **Trabajar con inversiones**

En cualquier inversión, se paga algo ahora para obtener algo más después. Consideramos que tener un dólar en su bolsillo hoy es más valioso para usted que tenerlo mañana. La razón por la que decimos esto es que puede invertir ese dólar en algún sitio o meterlo en una cuenta bancaria y ganar los intereses sobre ese dólar.

Así pues, para indicar la diferencia entre los dólares de hoy y de mañana utilizamos la tasa de interés. Si hacemos eso, un dólar de hace un año vale hoy  $1/(1+r)$ .  $r$  es la tasa de interés, p.ej. de un cinco por ciento al año. Así pues, un dólar de hace un año vale ahora  $1/1,05 = 0,9523$  dólares. Un dólar de hace dos años vale  $1/(1,05*1,05) = 0,9070$ , y así sucesivamente.

¿Pero que pasa con la inflación? Para tratar con eso simplemente debemos trabajar con dólares que tienen el mismo poder adquisitivo que los actuales. Los economistas lo llaman trabajar con valores reales, en lugar de con los nominales.

### **Trabajar en valores reales, no en valores nominales**

Una inversión en un aerogenerador le proporciona una rentabilidad real, es decir, electricidad, y no sólo una rentabilidad financiera (dinero efectivo). Esto es importante, porque si espera alguna inflación general en los precios durante los próximos 20 años, puede esperar que los precios de la electricidad sigan la misma tendencia. Así pues, esperaremos que los costes de operación y mantenimiento sigan aproximadamente la misma tendencia de precio que la electricidad. Si esperamos que todos los precios se muevan paralelamente (con las mismas tasas de crecimiento) en los próximos 20 años, podemos hacer nuestros cálculos de forma bastante sencilla: no necesitamos ajustar nuestros cálculos a la inflación, simplemente haremos todos nuestros cálculos al nivel de precios de nuestro año base, es decir, del año de nuestra inversión.

En otras palabras, cuando trabajamos con valores reales, trabajamos con dinero que representa una cantidad fija de poder adquisitivo.

### **Utilizar la tasa de interés real , no la tasa nominal**

Dado que estamos estudiando la tasa de rentabilidad real de la energía eólica tenemos que utilizar la tasa de interés real, esto es, la tasa de interés menos la tasa de inflación esperada (si ambas tasas son altas, digamos de alrededor del 10 por cien, realmente no se pueden restar los porcentajes, debería dividir de esta forma:  $(1+r)/(1+i)$ , pero no convirtamos esto en un curso de economía).

Las tasas de interés real para fines de cálculo están estos días cerca del cinco por ciento anual. Usted puede decir que en países de Europa Occidental están incluso por debajo del 3 por ciento. Algunas personas tienen una gran demanda de rentabilidad, por lo que pueden querer utilizar una tasa de interés real superior, digamos del 7 por ciento. Utilizar la tasa de interés del banco no tiene sentido, a menos que haga entonces cálculos nominales, es decir, añadir cambios en los precios en todas partes, incluso en el precio de la electricidad.

### 6.3 EMPLEO

#### Empleo en la industria eólica

##### 30.000 empleos en todo el mundo en 1995

La energía eólica empleó en 1995 a unas 30.000 personas en todo el mundo. Esta estimación se basa en un estudio de la Asociación danesa de la industria eólica, que fue publicado en 1995.

El estudio considera tanto el empleo directo como el empleo indirecto. Por empleo indirecto entendemos las personas que trabajan fabricando componentes de aerogeneradores, y los involucrados en la instalación de aerogeneradores en todo el mundo.

##### 9.000 empleos en Dinamarca

La industria eólica danesa tenía alrededor de 8.500 empleados en 1995. Puede ser interesante ver cómo se dividen entre los diferentes componentes:

Componente	Empleo
Ensamblaje de la turbina	3 600
Palas del rotor	2 000
Controladores	700

Frenos, hidráulica	200
Torres	1 500
Instalación de las turbinas	300
Otros	300
Total	8 300

En realidad la producción de aerogeneradores crea un 50 por ciento más de empleos, dado que los fabricantes daneses importan muchos de los componentes, como multiplicadores, generadores, bujes, etc. del extranjero. Además, los empleos generados por la instalación de los aerogeneradores en otros países.

## VII. MEDIO AMBIENTE

### 7.1 Aerogeneradores y entorno ambiental

Los aerogeneradores son siempre elementos altamente visibles en el paisaje. De lo contrario, no están situados adecuadamente desde un punto de vista meteorológico. La fotografía muestra el parque eólico de Kappel (Dinamarca). Probablemente sea la distribución más agradable desde el punto de vista estético conocida por

este autor. La forma del dique a lo largo de la costa se repite en la línea de las turbinas.

Sólo hay un elemento que molesta en la imagen de arriba: La única turbina de al lado de la granja, que interrumpe la que de otra manera sería una disposición uniforme de las turbinas (esa turbina ya estaba ahí antes de que se construyera el parque eólico).



[www.windpower.gob](http://www.windpower.gob)

### **Disposiciones geométricas simples**

En áreas llanas suele ser una buena idea situar las turbinas en una distribución geométrica simple,

fácilmente perceptible por el espectador. Las turbinas situadas equidistantemente a lo largo de una línea recta es una buena solución, aunque el ejemplo de la fotografía de arriba puede ser incluso más elegante, donde los contornos del paisaje invitan a una solución así.

Sin embargo, existen límites a la utilidad de ser dogmáticos sobre la utilización de patrones simples:

En paisajes con fuertes pendientes, rara vez es viable la utilización de un patrón simple, y suele ser mejor hacer que las turbinas sigan los contornos de altitud del paisaje, o los cercados u otras características del paisaje.

Cuando las turbinas están situadas en varias filas, rara vez es posible percibir la distribución cuando se mira el parque desde una altura de los ojos normal. Sólo si nos situamos al final de una fila, aparece realmente como una distribución ordenada. En la siguiente fotografía panorámica, probablemente sólo sea capaz de discernir tres filas de turbinas, mientras que el resto parece que está disperso por todo el paisaje

### **Pintura gris claro**

La fotografía de arriba muestra una de las mayores agrupaciones de aerogeneradores daneses en Næssuden,

en la isla de Gotland (Suecia). La pintura gris de las turbinas hace que se confundan bien con el paisaje.

### **Tamaño de los aerogeneradores**

Los grandes aerogeneradores permiten una producción igual de energía con un menor número de aerogeneradores. Esto puede suponer ciertas ventajas económicas, como menores costes de mantenimiento.

Desde un punto de vista estético, los grandes aerogeneradores también suponen una ventaja, porque generalmente tienen una velocidad de rotación menor que las turbinas más pequeñas. Así pues, en general las grandes turbinas no llaman la atención de la misma forma que lo hacen los objetos que se mueven rápidamente.

### **Percepción de la gente de los aerogeneradores en el paisaje**

Cómo perciba la gente que los aerogeneradores encajan en el paisaje es en gran medida una cuestión de gusto.

Numerosos estudios en Dinamarca, Reino Unido, Alemania y los Países Bajos han revelado que la gente que vive cerca de aerogeneradores están generalmente más a favor de ellos que los habitantes de las ciudades.

Un bonito libro de fotografía con ejemplos de aerogeneradores en el paisaje puede ser adquirido en Birk Nielsens Tegnestue, Aarhus (Dinamarca). Su precio aproximado es de 150 coronas danesas, gastos de envío no incluidos.

## **7.2 Las aves y los aerogeneradores**

Las aves colisionan a menudo con líneas aéreas de alta tensión, mástiles, postes y ventanas de edificios. También mueren atropelladas por los automóviles.

Sin embargo, rara vez se ven molestadas por los aerogeneradores. Estudios de radar en Tjaereborg, en la parte occidental de Dinamarca, donde hay instalado un aerogenerador de 2 MW con un diámetro de rotor de 60 metros, muestran que las aves (bien sea de día o de noche) tienden a cambiar su ruta de vuelo unos 100-200 metros antes de llegar a la turbina, y pasan sobre ella a una distancia segura.

En Dinamarca hay varios ejemplos de aves (halcones) anidando en jaulas montadas en las torres de los aerogeneradores.

El único emplazamiento conocido en el que existen problemas de colisión de aves está localizado en

Altamont Pass, en California. Incluso allí, las colisiones no son comunes, aunque la preocupación es mayor dado que las especies afectadas están protegidas por ley.

Un estudio de Ministerio de Medio Ambiente danés indica que las líneas de alimentación, incluidas las líneas de alimentación que conducen a los parques eólicos, representan para las aves un peligro mucho mayor que los aerogeneradores en sí mismos.

Algunas aves se acostumbran a los aerogeneradores muy rápidamente, a otras les lleva algo más de tiempo. Así pues, las posibilidades de levantar parques eólicos al lado de santuarios de aves depende de la especie en cuestión. Al emplazar los parques eólicos normalmente se tendrán en cuenta las rutas migratorias de las aves, aunque estudios sobre las aves realizados en Yukon en el norte de Canadá muestran que las aves migratorias no colisionan con los aerogeneradores (Canadian Wind Energy Association Conference, 1997).

### **7.3 Ruido en turbinas**

#### **Ruido de fondo: el ruido enmascarador ahoga el ruido de la turbina**

Ningún paisaje está nunca en silencio absoluto. Por ejemplo, las aves y las actividades humanas emiten sonidos y, a velocidades de viento de alrededor de 4-7 m/s y superiores, el ruido del viento en las hojas, arbustos, árboles, mástiles, etc. enmascarará (ahogará) gradualmente cualquier potencial sonoro de los aerogeneradores.

Esto hace que la medición del sonido de los aerogeneradores de forma precisa sea muy difícil. Generalmente, a velocidades de 8 m/s y superiores llega a ser una cuestión bastante abstrusa el discutir las emisiones de sonido de los modernos aerogeneradores, dado que el ruido de fondo enmascarará completamente cualquier ruido de la turbina.

#### **La influencia de los alrededores en la propagación del sonido**

La reflexión del sonido por parte de las superficies del terreno y de los edificios puede hacer que el mapa de sonido sea diferente en cada localización. En general, corriente arriba de los aerogeneradores apenas se oye ningún sonido. Por lo tanto, la rosa de los vientos es importante para registrar la dispersión sonora potencial en diferentes direcciones.

#### **La percepción humana del sonido y del ruido**



La mayoría de la gente encuentra agradable oír el sonido de las olas en la orilla del mar, y a bastantes de nosotros les molesta el sonido de la radio del vecino, aunque el nivel real de sonido pueda ser bastante menor. Aparte de la cuestión del gusto musical de su vecino, obviamente existe una diferencia en términos de contenido de información. Las olas del mar emiten un ruido "blanco" aleatorio, mientras que la radio de su vecino tiene algún contenido sistemático que su cerebro no puede evitar discernir y analizar. Si normalmente le resulta antipático su vecino, sin duda estará incluso más molesto con el sonido. A falta de una definición mejor para "ruido", los expertos lo definen como "sonido no deseado".

Dado que la distinción entre ruido y sonido es un fenómeno con un alto factor psicológico, no es fácil elaborar un modelo sencillo y universalmente satisfactorio del fenómeno del sonido. De hecho, un estudio llevado a cabo por el instituto de investigación danés "DK Teknik" parece indicar que la percepción del sonido de los aerogeneradores por parte de las personas está más gobernada por su actitud hacia la fuente de sonido que por el sonido real en sí mismo.

## CONCLUSIONES

Resulta claro que en las instituciones públicas y privadas de países industrializados aún existe importante actividad de I,D+D (Investigación, desarrollo tecnológico y demostración) sobre la tecnología eoloeléctrica con el propósito de alcanzar la madurez real de la tecnología en el mediano o largo plazo. La implantación de esta tecnología en varios de los países en vías de transición tiene un horizonte de tiempo que no rebasa el mediano plazo. Por lo tanto, resulta conveniente que en México, y en general en los países en transición, en el presente y a corto plazo la I+D,D sobre la tecnología eoloeléctrica se enfoque a los siguientes aspectos:

- Asimilar, aplicar, validar y, si es necesario, adecuar la metodología desarrollada en los países líderes.
- Formar recursos humanos especializados en los diferentes tópicos de la tecnología (técnico, ambiental, económico).
- Constituir elementos de apoyo técnico a la formulación de estrategias y programas de implantación de la tecnología y planeación de los mismos.
- Conocer detalladamente y generar indicadores sobre las ventajas y limitaciones de las opciones tecnológicas de aerogeneradores.
- Constituir elementos de apoyo para la formulación de proyectos eoloeléctricos y para realizar estudios de factibilidad técnicoeconómica.
- Prepararse para coadyuvar a la industria en los procesos de transferencia de tecnología.
- Coadyuvar en la asimilación de normas, especificaciones técnicas y recomendaciones.
- Constituir el punto focal de apoyo técnico para el seguimiento operacional de aplicaciones y evaluación de las mismas.
- Constituir el punto focal de identificación de problemas técnicos potenciales y anticipar soluciones.
- Fomentar la asistencia técnica internacional para mantenerse en el estado del arte de la tecnología y conocer sus tendencias,

así como los elementos de éxito y de fracaso.

- Constituir el punto focal de difusión de información técnica digerida para el ámbito nacional. Se ha demostrado que mediante esfuerzos conjuntos de instituciones de investigación de países en transición con fabricantes de aerogeneradores es posible mejorar la tecnología, adecuándola a las condiciones locales. Por ejemplo, en el Centro Brasileño de Energía Eólica se ha demostrado que mediante la adecuación de la geometría de aspas a un régimen de viento específico, se puede lograr un incremento cercano al 10% respecto al potencial de generación de electricidad. Este tipo de resultados puede conducir a mejorar significativamente la rentabilidad de proyectos eoloeléctricos en áreas específicas de desarrollo potencial, independientemente de que los modelos originales ya operen correctamente bajo condiciones diferentes. En resumen, la I,D+D sobre la energía eólica en los países en vías de transición es fundamental ya que *saber cómo* no es suficiente, también se debe saber: *por qué, para qué, cuándo, de qué forma, cuánto, con qué y quién.*

### Una energía con ventajas :

La energía eólica presenta ventajas frente a otras fuentes energéticas convencionales :

- Procede indirectamente del sol , que calienta el aire y ocasiona el viento .
- Se renueva de forma continua .
- Es inagotable .
- Es limpia . No contamina .

- o Es autóctona y universal . Existe en todo el mundo .
- o Cada vez es más barata conforme avanza la tecnología .
- o Permite el desarrollo sin expoliar la naturaleza , respetando el medio ambiente .
- o Las instalaciones son fácilmente reversibles. No deja huella .

#### Una energía limpia :

La generación de electricidad a partir del viento no produce gases tóxicos , ni contribuye al efecto invernadero , ni a la lluvia ácida . No origina productos secundarios peligrosos ni residuos contaminantes . Cada Kw.h de electricidad , generada por energía eólica en lugar de carbón, evita la emisión de un Kilogramo de dióxido de carbono-CO<sub>2</sub> - a la atmósfera . Cada árbol es capaz de absorber 20 Kg de CO<sub>2</sub> ; generar 20 Kilowatios de energía limpia , tiene el mismo efecto , desde el punto de la contaminación atmosférica , que plantar un árbol .

#### **¿ Qué ventajas aporta el viento ?**

1. La electricidad producida por un aerogenerador evita que se quemen diariamente 3.150 Kg. de lignito negro en una central térmica .
2. Ese mismo generador produce idéntica cantidad de energía eléctrica que la

obtenida por quemar diariamente 1.000 Kg. de petróleo.

3. Al no quemarse esos Kg. de carbón , se evita la emisión de 4.109 Kg. de CO<sub>2</sub> , lográndose un efecto similar al producido por 200 árboles .
4. Se impide la emisión de 66 Kg. de dióxido de azufre -SO<sub>2</sub>-y de 10 Kg de óxido de nitrógeno -NO<sub>x</sub>-principales causantes de la lluvia ácida .

“La energía eólica no contamina , frena el agotamiento de combustibles fósiles y contribuye a evitar el cambio climático”.

#### **Desventajas de la energía eólica**

Para muchas personas tienen un impacto visual. Su instalación genera una alta modificación del paisaje.

También en algunas zonas donde se encuentran los parques eólicos se han dado impactos sobre la fauna, afectando principalmente a las aves.

También tienen impactos sonoros, recomendándose que las casas más cercanas deben estar a más de 200 metros.

## BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

- Sofia and Stephan Behinh. *Sol Power*. Ed. Prestel, Munich, Germany, 1996.
- Tomas Herzog. *Solar Energy in Architecture and Urban Planning*. Ed. Prestel, Munich, Germany, 1997.
- Catherine Siessor. *Eco-Tech, -Architecture high-tech y Sostenibilidad-*. Ed. Gustavo Gili, Barcelona, España, 1997.
- *Anuario de Estudios de Arquitectura Bioclimatica*, Vol. 1. Ed. Universidad Autónoma Metropolitana, México, 1997.
- *Anuario de Estudios de Arquitectura Bioclimatica*, Vol. 2. Ed. Universidad Autónoma Metropolitana, México, 1998.
- Mazria Edward. *El Libro de la Arquitectura Solar Pasiva*. Asociación Nacional de Energía Solar ANES, Memorias de Congresos 1985-1997. Ed. Gustavo Gili, México, 1985
- Quintana. *Con el Sol en la Mano*. Ed. UNAM, 1938
- Steven Szokolay. *Environmental Science Handbook*. Ed. The Construction Press, England, 1980.
- Orion McDonald. *Buid it with bales: A steep by steep guide to straw-bale construction*. Ed. Out-on-bale. USA, 1992.
- Steen & Steen. Athena and Bill. *The Straw-bale House*, Chelsea Publishing Company. USA, 1994.
- Robert Laporte. Mooseprint; E. *Natural House Building Center*.1992.
- Paul Oliver. *Dweelings, the houese acroos tha world*. Austing Texas University.ESA,1990.
- Rolando Stulz. *Construyendo con Materiales de Bajo Costo, Guía de Soluciones Potenciales*. Cetal Ediciones, Valparaíso Chile 1993.
- Barry Shapiro & Boericke, Art; *Handmade houses, a guide to the Woolbuthcer's art*; Scrimshaw Press. Johanesburg 1981.
- Jhon Ormsbee. *Earth Construction, a comprehensive guide to earth scape*. USA, 1990.
- David Pearson. *Earth to spirit in search of natural arqchitecture*. USA,1992.

## RECURSOS DE INTERNET

- [www.elcroquis.com](http://www.elcroquis.com)
- [www.arquinauta](http://www.arquinauta)
- [www.cristaledo.com](http://www.cristaledo.com)
- [www.artnet.com](http://www.artnet.com)

- [www.uni-weirmar.de](http://www.uni-weirmar.de)
- [www.uam.mx](http://www.uam.mx)
- [www.unam.mx](http://www.unam.mx)
- [www.arq.unam.mx](http://www.arq.unam.mx)
- [www.ce-alt.posgrado.unam.mx](http://www.ce-alt.posgrado.unam.mx)
- [www.enlace.com](http://www.enlace.com)
- [www.todoarquitectura.com](http://www.todoarquitectura.com)
- [www.windpower.com](http://www.windpower.com)
- [www.rnw.dk](http://www.rnw.dk)
- [www.ecodigital.com](http://www.ecodigital.com)
- [www.enersolar.com](http://www.enersolar.com)
- [www.arquisolar.com](http://www.arquisolar.com)
- [www.kalathos.com](http://www.kalathos.com)
- [www.btmconsult.com](http://www.btmconsult.com)
- [www.domotica.net](http://www.domotica.net)
- [www.alabe.es](http://www.alabe.es)
- [www.erpt.net](http://www.erpt.net)
- [www.conae.gob.mx](http://www.conae.gob.mx)
- [www.enalmex.com](http://www.enalmex.com)
- [www.anes.org](http://www.anes.org)
- [www.lea.org](http://www.lea.org)
- [www.biodiversidadla.org](http://www.biodiversidadla.org)
- [www.vatech.com](http://www.vatech.com)
- [www.web-strategies.com/puebla/elmex](http://www.web-strategies.com/puebla/elmex)
- [www.natura.com](http://www.natura.com)
- [www.ecored.com](http://www.ecored.com)

## GLOSARIO

Abreviaturas de las unidades

m = metro = 3,28 pies

s = segundo

h = hora

N = Newton

W = vatio

CV= caballo de vapor

J = julio

cal = caloría

tep = tonelada equivalente de petróleo Hz= hercio (ciclos por segundo)

10<sup>-12</sup> = p pico = 1/1000.000.000.000

10<sup>-9</sup> = n nano = 1/1000.000.000

10<sup>-6</sup> = μ micro = 1/1000.000

10<sup>-3</sup> = m mili = 1/1000

10<sup>3</sup> = k kilo = 1.000 = millares

10<sup>6</sup> = M mega = 1.000.000 = millones

10<sup>9</sup> = G giga = 1,000.000.000

10<sup>12</sup> = T tera = 1.000.000.000.000

10<sup>15</sup> = P peta = 1.000.000.000.000.000

### Velocidades del viento

1 m/s = 3,6 km/h = 2,237 millas/h = 1,944 nudos

1 nudo = 1 milla náutica/h = 0,5144 m/s = 1,852 km/h = 1,125millas/h

### Potencia de viento

		Potencia del viento **)			
m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>
0	0	8	313.6	16	2508.8

1	0.6	9	446.5	17	3009.2
2	4.9	10	612.5	18	3572.1
3	16.5	11	815.2	19	4201.1
4	39.2	12	1058.4	20	4900.0
5	76.5	13	1345.7	21	5672.4
6	132.3	14	1680.7	22	6129.9
7	210.1	15	2067.2	23	7452.3

\*) Para una densidad del aire de  $1,225 \text{ kg/m}^3$ , correspondiente al aire seco a la presión atmosférica estándar al nivel del mar y a  $15^\circ \text{ C}$ .

La fórmula para la potencia por  $\text{m}^2$  en  $W$  es  $0,5 * 1,225 * v^3$ , donde  $v$  es la velocidad del viento en  $\text{m/s}$ .

### Escala Beauford

Metros/seg	Nudos	Escala Beauford anticuada	Viento
0,0-0,4	0,0-0,9	0	Calma
0.4-1.8	0,9-3,5	1	
1,8-3,6	3,5-7,0	2	Ligero
3,6-5,8	7-11	3	
5,8-8,5	11-17	4	Moderado
8,5-11	17-22	5	Fresco
11-14	22-28	6	
14-17	28-34	7	Fuerte
17-21	34-41	8	
21-25	41-48	9	Temporal
25-29	48-56	10	
29-34	56-65	11	Fuerte temporal
>34	>65	12	Huracan

## ANEXOS

Clase	a 30 m de altura		a 50 m de altura	
	Velocidad del viento m/s	Potencia del viento W/m <sup>2</sup>	Velocidad del viento m/s	Potencia del viento W/m <sup>2</sup>
1	0-5.1	0-160	0-5.6	0-200
2	5.1-5.9	160-240	5.6-6.4	200-300
3	5.9-6.5	240-320	6.4-7.0	300-400
4	6.5-7.0	320-400	7.0-7.5	400-500
5	7.0-7.4	400-480	7.5-8.0	500-600
6	7.4-8.2	480-640	8.0-8.8	600-800
7	8.2-11.0	640-1600	8.8-11.9	800-2000

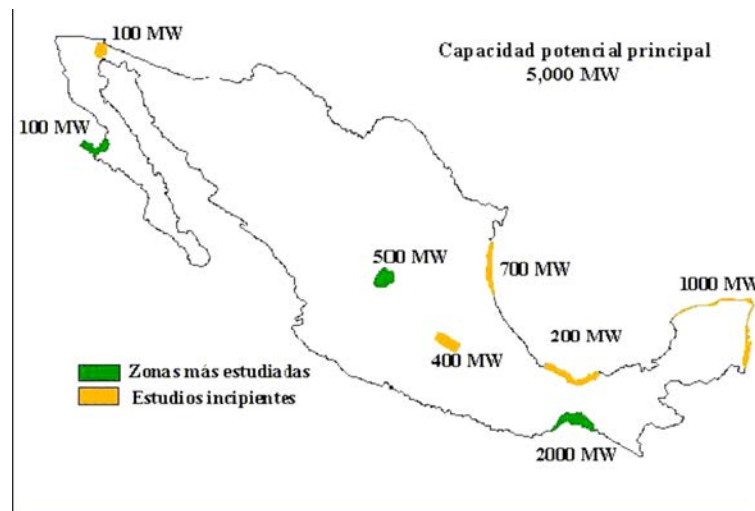
La zona Noroeste (NO), está integrada por las estaciones de monitoreo, con torre meteorológica, Tacuba (TAC), ENEP Acatlán (EAC) y Tlalnepantla (TLA).

- La zona Noreste (NE), se forma por las estaciones San Agustín (SAG), Xalostoc (XAL), Villa de las Flores (VIF) y Chapingo (CHA).
- La zona Centro (CE), cuenta con las estaciones Merced (MER) y Hangares (HAN) que miden los parámetros meteorológicos.
- La zona Suroeste (SO), la conforman las estaciones Santa Ursula (SUR), Pedregal (PED), Plateros (PLA), Cuajimalpa (CUA) y Tlalpan (TPN).
- Finalmente, la zona Sureste (SE), se compone con las estaciones Cerro de la Estrella (CES) y Tláhuac (TAH).

En 1992 se realizó un estudio del potencial eólico en el Cerro de La Virgen, Zac., con objeto de realizar la configuración topológica de una central de 2 MW10. En dicho estudio se determinó en forma mensual, estacional y anual a 10 y 30 metros de altura la velocidad promedio, desviación estándar, parámetros k y c de la f.d.p. de Weibull, densidad de potencia en W/m<sup>2</sup>, energía disponible en kWh/m<sup>2</sup> y porcentaje de tiempo con velocidades  $\geq 5$  m/s.



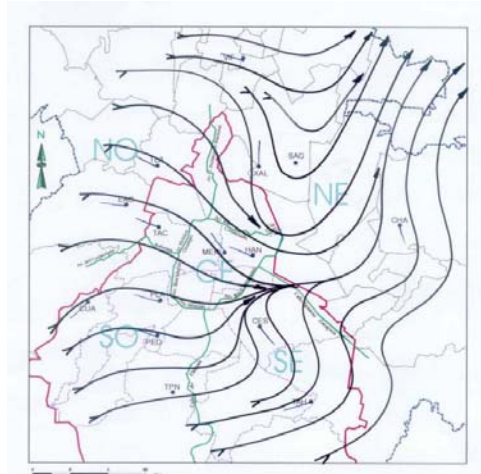
En 1995 se publicó el documento *Mexico Wind Resource Assessment Project*, en el cual presenta como resultado mapas donde se aprecian zonas en las que el potencial eólico puede ser aprovechado energéticamente. Este estudio incluye comparaciones en la estimación de la densidad de potencia del viento con el atlas de OLADE publicado en 1983. Según se observa en el estudio existe una gran diferencia entre los valores de OLADE y NREL11. En 1998 se publicó un mapa con las regiones con posibilidades en México para la construcción de centrales eolieléctricas y realizó una comparación del potencial eólico de la zona de La Ventosa, Oax. con otros sitios con velocidades de viento intensas a nivel mundial. En esta publicación se indican los sitios donde la CFE y el IIE han llevado a cabo mediciones anemométricas dentro del territorio nacional.



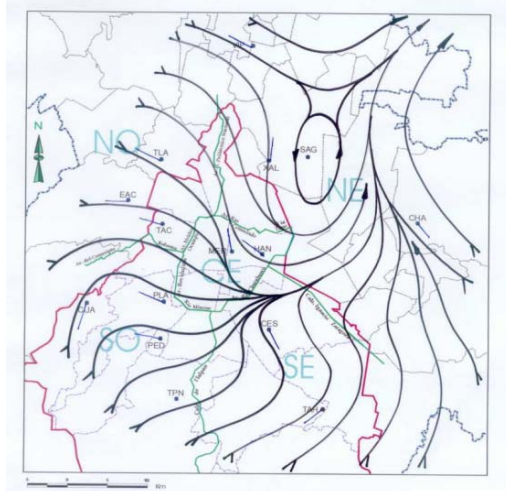
## VIENTO

### FLUJO DE VIENTO EN EL VALLE DE MEXICO

Este Anexo es complementario al Capítulo 2, referente a los campos de viento en el Valle de México. La interpretación es igualmente válida para esta serie de figuras dentro de las cuales se contempla un mapa horario con el promedio anual del viento para el período de 24 horas, correspondiente al año 2004. En la serie faltan los mapas horarios de las 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 y 24 hrs. correspondientes al servicio



**Flujo medio anual del Viento en el Valle de México a las 01:00 horas (mapa 1 de 24).**



**Flujo medio anual del viento en el Valle de México a las 02:00 horas (mapa 2 de 24).**