



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ARAGÓN**

**AEROGENERADORES Y
PARQUES EÓLICOS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
I N G E N I E R A C I V I L

P R E S E N T A :

YANNEYCY HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ

DIRECTOR M.EN I. PATROCINIO ARROYO HERNÁNDEZ

San Juan de Aragón, Edo. De México, octubre de 2014





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.



AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

A MIS PADRES

Quiero agradecerles lo que ahora soy...

Gracias por darme la vida.... Por su amor, por las caricias, por el dolor, por las sonrisas por el sufrimiento, por los regaños y por el aliento.

Gracias por el ejemplo de la honradez, del entusiasmo y la calidez, por enseñarme a dar de intensa forma y nada esperar, por los consejos y las caídas por enseñarme como es la vida....

Gracias con todo mi corazón, gracias por ser como son, que Dios no pudo escoger de una manera mejor, a mis padres, la pareja que ustedes son los amo.

A MI MAMI

A ti te doy gracias por traerme al mundo

A ti que me has enseñado a andar por el destino...

Te agradezco todas las cosas que has hecho por mí

Por sacrificar tu tiempo y espacio para quedarte conmigo...

A ti que me has dado tanto

Hoy quiero decirte que te amo mi dulce rosa de pétalos suaves y fortaleza de roble

Gracias por verme realizar mis sueños

A ti mi hermosa mamita, porque no cambiaría ni un segundo de mi vida contigo.

A MI PAPI

A ti por tus reproches y consejos.

Por el bien que me enseñaste y de mi ser siempre cuidaste

Caballero noble me enseñaste a luchar aspirando siempre a lo más alto y a mis sueños no renunciar.

Gracias por guiarme de la mano, por cumplir con tus deberes,

Porque nunca me fallaste, porque contigo contar siempre puedo.

Hoy y siempre mi amor te entrego. A ti papi gracias por estar a mi lado.

A MIS HERMANOS

Los que son fuertes y débiles a la vez, pero con todas sus cualidades y defectos, sé que me aman, me cuidan, reñimos, no son perfectos, lloramos, jugamos. Pero nunca dejamos de ser hermanos, los amo.

A MI HERMANO MAYOR

A mi guía porque siempre me acompaña con él no hay temores ni cobardía porque juntos libramos las batallas, es un guerrero en la inmensa batalla de la vida, y en vista de que él nació primero me ayuda con su experiencia adquirida.

Mi hermano mayor tiene un monumento erigido desde tiempos de mi infancia... Es el soldado que en todo momento me da el alerta para ponerme en guardia. Gracias grandotes por todo te adoro, te admiro, y doy gracias a la vida por tenerte como hermano, por permitirme abrazarte cada vez que nos vemos.

**A MI HERMANITO**

*A mi tesoro de vida, que en su mirada inocente puedo ver todo un mundo lleno de ilusiones y sueños.
Hermano menor, mi corazón no podría estar sin ti mi pequeño niño, mientras esté en tu camino no
estarás solo.*

*Vamos a estar juntos, en las buenas y en las malas cuando tu tierno rostro se cubra de lágrimas voy a
estar a tu lado.*

*Porque serás y seguirás siendo mi angelito, la luz que vino a iluminarnos en la oscuridad en la que
estábamos todos, te amo mi chiquito gracias por estar aquí.*

A MI ASESOR, MAESTRO Y AMIGO

*A usted que lleva en el pensamiento, la enseñanza como escudo, bendito sea su trabajo una bella y noble
misión.*

*Es un gran confidente, un entrañable amigo, que espero seguir sus pasos quizá no sea en un salón, pero
cualquiera que sea mi destino vivirá en mi corazón.*

*Gracias por enseñarme con su ejemplo para seguir adelante, en esta etapa de mi vida. Por corregir mis
errores de ortografía, por animarme con sus consejos, por escucharme con interés a pesar de su tiempo. . .*

*A usted mi querido maestro gracias por todo, que la vida nos llene de dicha y sonrisas como con la que
siempre me ha recibido desde que nos conocemos, lo quiero mucho.*

A MIS AMIGOS

*Nunca pensé, que esta amistad fuera tan grande y ahora lo sé, mis buenos amigos. A medida que pase el
tiempo vamos a ir distanciando cada vez más pero sé que esta amistad se conservará como el inmenso
mar. Mi cariño hacia ustedes es tan grande como el universo, fuerte como el hierro pero tan tierno, como
las nubes y el cielo. Gracias a todos y cada uno de ustedes por brindarme su tiempo y compartir sus vidas.*

A TI

*Gracias a ti por llegar a mi vida por borrar mis lagrimas y sacarme sonrisas que la vida nos permita estar
juntos, así como el destino nos encontró de nuevo, a ti. . .*

**A DIOS Y A LA VIDA
VIDA**

*Gracias le doy a la vida, por las cosas simples y también por las complejas. Por las alegrías, por las
tristezas, por los sueños logrados y por lo que aún quedan por lograr. Pues eso me indica que aún tengo
que avanzar. Gracias por mi familia, por mis amigos, los reales que son pocos.*

Gracias dios por dejarme vivir a lado de los seres que más me han amado

*Gracias por tantas cosas...pero sobre todo, te doy gracias por el don que me das cada mañana al
permitirme despertar.*

**ESTO NO ES UN LOGRO MIO ES UN LOGRO NUESTRO GRACIAS FAMILIA, GRACIAS A
TODOS LOS QUE CONTRIBUYERON A MI SUEÑO, GRACIAS FES Aragón -UNAM.**



I N D I C E

Introducción

Objetivo

Alcances

I. CONSIDERACIONES GENERALES

- 1.1 La energía y sus procesos.
- 1.2 Energía eólica.
- 1.3 Poder del viento.
- 1.4 Recurso eólico en México.

II. TURBINAS EÓLICAS

- 2.1 Breve reseña histórica.
- 2.2 Elementos constitutivos.
- 2.3 Principio físico de funcionamiento.
- 2.4 Comportamiento hidráulico.
- 2.5 Ecuaciones generales del movimiento.

III. ACOPLAMIENTO HIDRÁULICO

- 3.1 Características de un parque eólico.
- 3.2 Ventajas y desventajas.
- 3.3 Fases del proyecto.

IV. PARTICULARIDADES DEL DESARROLLO EÓLICO EN MÉXICO

- 4.1 Parques eólicos actualmente en operación.
- 4.2 Principales fabricantes y proveedores.
- 4.3 Micro eólica aplicada en la construcción.

Conclusiones

Bibliografía



I N T R O D U C C I Ó N

La energía eléctrica ha sido el impulsor del desarrollo industrial del ser humano, creada comúnmente por medio de la quema de combustibles fósiles. Sin embargo, debido a que este tipo de generación eléctrica es contaminante, costosa y en algunos años será insuficiente; es necesario impulsar las fuentes alternativas de producción conocidas, mediante el uso de energía renovable que contribuya a satisfacer las necesidades energéticas de la población y la industria. Una de estas opciones es la energía obtenida a través del viento, un recurso que la naturaleza nos ofrece de forma completamente gratuita, motivo por el que la eólica destaca como rentable y eficiente.

Para su aprovechamiento a nivel energético se hace uso de aerogeneradores, máquinas capaces de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica, la cual a su vez es transformada en electricidad. Pero aún a estas fechas tal aprovechamiento, tiene limitaciones, razón, por la que me di a la tarea de llevar a cabo la presente investigación, con la intención de reunir en este trabajo los aspectos sobresalientes junto con sus restricciones y de esta manera proporcionar una fuente de consulta a los estudiantes de ingeniería así como también a personas que estén interesadas en el tema que me ocupa.

Para lograr lo anterior, el desarrollo de este escrito plantea el siguiente

O B J E T I V O .

Introducir bajo un enfoque sencillo, los aspectos fundamentales y avances tecnológicos del desarrollo de la generación de energía eléctrica en México, con tecnología renovable mediante el empleo de turbinas eólicas.



ALCANCES

Dentro de los alcances que esta tesis muestra se consideran cuatro rubros, que conforman el contenido de la misma y los cuales son tratados como se menciona en el siguiente resumen:

CAPÍTULO I. CONSIDERACIONES GENERALES.



Se introduce al lector al tema de la energía eólica como fuente de energía limpia, hablando del origen de los vientos, sus características, formas de medición y sus cambios dependiendo de las condiciones en el que se presente. Así mismo hace mención de la notable presencia potencial de este recurso en distintas zonas de la república Mexicana.

CAPÍTULO II. TURBINAS EÓLICAS.



Primeramente se expone la evolución de las turbinas eólicas, luego se describen los componentes, la función y las características de los aerogeneradores, para luego tratar de manera general algunos aspectos técnicos sobre diversas teorías que involucran la energía del viento.

CAPÍTULO III. ACOPLAMIENTO HIDRÁULICO.



Se especifican las particularidades que deben reunir los parques eólicos según el tipo de emplazamiento que se emplee, así como los beneficios y contrariedades que trae consigo el aprovechamiento de este tipo de energía y los pasos a seguir para conformar un proyecto de esta índole.



Capítulo IV PARTICULARIDADES DEL DESARROLLO EÓLICO EN MÉXICO.



Se puntualiza el crecimiento de instalaciones eólicas en la República Mexicana y se destaca a los estados con mayor capacidad de producción eléctrica. Se continúa con la referencia de las empresas más sobresalientes en la construcción de plantas eólicas en el país, y por último la adecuación de esta tecnología a pequeña escala para ser aprovechada en la edificación.

“Hay una energía muscular en la luz solar que corresponde a la energía espiritual del viento”

Anni Dillard



CAPITULO I
CONSIDERACIONES
GENERALES

CAPITULO I

CONSIDERACIONES GENERALES

1.1 LA ENERGÍA.

La energía es uno de los fenómenos naturales más importantes y misterioso de la naturaleza, debido a que no podemos verla, sin embargo, la reconocemos cuando se manifiesta en forma de calor, de electricidad y de movimiento, entre otros.

Por su naturaleza, se distinguen en los cuerpos dos tipos esenciales de energía, a saber *la potencial* y *la cinética* (figura 1). La primera depende de la posición o altura respecto a un sistema de referencia por ejemplo, una piedra sobre una montaña, entre más altura, mayor energía potencial y la segunda al movimiento o velocidad, Por ejemplo el agua al caer de una cascada.

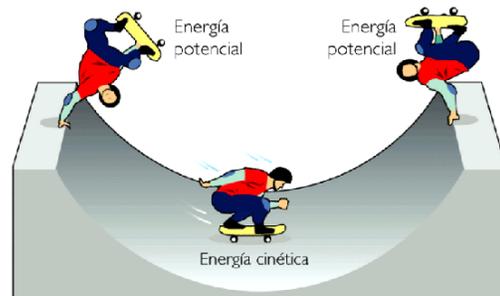


Figura 1. Se muestra la diferencia entre La energía potencial y cinética.

“Energía Potencial y Energía Cinética”. Imagen tomada del sitio. <http://energiacinetica.org/8fecha>. (Fecha de actualización 31 de enero del 2014).

La energía se manifiesta de varias formas¹, dando lugar a otras clasificaciones, que en realidad en su esencia o son energía cinética o potencial o bien una combinaciones de estas. Tales son: la energía calórica o térmica, producida por el aumento de la temperatura de los objetos. Los cuerpos están formados por moléculas que cuando aceleran su movimiento originan mayor temperatura y esto produce energía calórica, como ocurre cuando calentamos agua hasta hervir y esto produce una gran cantidad de vapor. La energía química,

¹ Todos los tipos de energía pueden transformarse en otro tipo, “la energía, no se crea ni se destruye, solo se transforma”.



provocada por reacciones químicas que desprenden calor o que por su violencia pueden desarrollar algún trabajo o movimiento. Un ejemplo de esto, son los alimentos ya que al ser procesados por el organismo nos ofrecen calor (calorías). La energía eléctrica, Esta es la más conocida y utilizada por el hombre. Es producida por el movimiento de las cargas eléctricas en el interior de los materiales conductores. Existen muchas otras formas de energía que tienen gran aplicación práctica en la industria como: la nuclear y la radiante.

A lo largo del tiempo el hombre ha comprendiendo la importancia que tiene la energía en la naturaleza y ha aprendido a utilizarla a su favor, empleándola para el progreso de la civilización (*figura 2*). Actualmente es imprescindible en todas sus actividades, a tal grado que su confort se basa en el empleo de máquinas que la transforman de un tipo a otro, hasta obtener la energía eléctrica, tan común en la vida cotidiana.



Figura 2. Aprovechamiento de la energía a través del tiempo por el hombre.

“Evolución de las formas de energía utilizadas por el ser humano”. Imagen tomada del sitio http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448180577.pdf_pagina_12. (Fecha de actualización 31 de enero del 2014).

El origen de casi todas las fuentes de energía² es el *Sol* (*figura 3*), que por una parte permite el ciclo de la vida³, el cual constituye la base que forma el combustible fósil para la producción de energía no renovable y por otra, produce en la atmósfera las diferencias de temperatura que producen los vientos, las olas y las lluvias que dan lugar fuentes de energía renovable.

² Son los recursos existentes en la naturaleza de los que podemos obtener energía utilizable para nuestras actividades.

³ Las plantas crecen y sirven de alimento a los animales herbívoros y éstos a su vez a los carnívoros, los cuales al morir se convierten en materia orgánica que se acumula en la tierra y luego de millones de años originan los yacimientos de petróleo, gas natural y carbón.

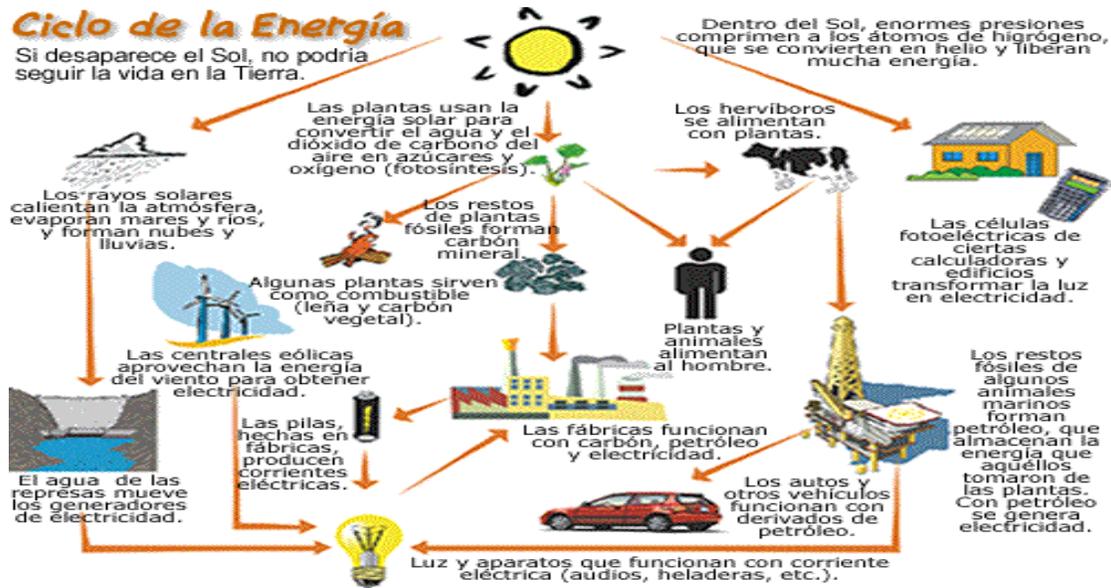


Figura 3. En este esquema se destaca la importancia del sol como fuente de energía para la vida y actividad humana.

“Ciclo de la energía”. Imagen tomada del sitio <http://fisica2icel.blogspot.mx/2010/11/energia-y-sus-transformaciones.html>. (Fecha de actualización 31 de enero del 2014).

La energía eléctrica útil que aprovecha el hombre, es un tipo de energía que proviene de la transformación de diversas fuentes de energía, entre ellas están **los combustibles fósiles** y **las fuentes de energía renovable**⁴.

Los combustibles fósiles (figura 4) son sustancias originadas por la acumulación, hace millones de años, de grandes cantidades de restos de seres vivos en el fondo de lagos y otras cuencas sedimentarias.

Se encuentran de forma limitada en el planeta su velocidad de consumo es mayor que la de su regeneración, por ello se consideran **Recursos no renovables**.

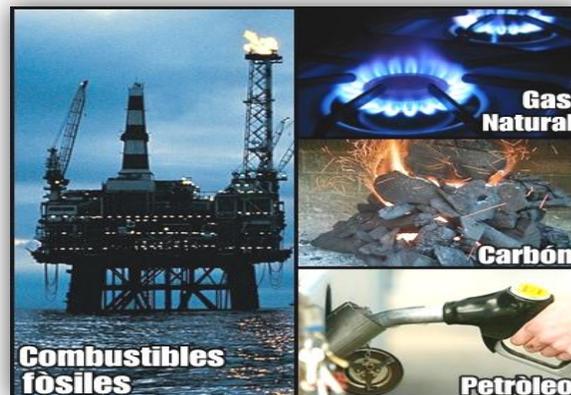


Figura 4. Se representan las fuentes de energía no renovable carbón, petróleo y gas natural.

“Combustibles fósiles”. Imagen tomada del sitio <http://arcoirisdelavida.blogspot.mx/2012/07/los-combustibles-fosiles-la-crisis.html>.

(Fecha de actualización 31 de enero del 2014).

⁴ Como el sol, el viento, la térmica, el agua, entre otras.



Figura 5. Se muestran las diferentes fuentes de energía renovable.

“Energías renovables”. Imagen tomada del sitio. <http://red.pucp.edu.pe/ciclodevida/index.php/es/blog/item/16energ%C3%ADas-renovables.html>.

(Fecha de actualización 31 de enero del 2014).

Las fuentes de energía renovables (figura 5) son un recurso inagotable respecto del ciclo de vida humano, presentan la característica de ser abundantes y limpias. Entre ellas podemos mencionar, la solar, la hidráulica y la eólica.

1.2 ENERGÍA EÓLICA.

Es la obtenida de la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, para ser transformada en energía eléctrica útil a la actividad humana. El término eólico viene del latín Aeolicus, perteneciente o relativo a Eolo, Dios de los Vientos en la mitología griega.

Se considera como una forma indirecta de energía solar, en la que alrededor del uno al dos por ciento de esta es convertida en energía eólica. Debido, fundamentalmente, a la redondez de la Tierra, se originan diferencias de insolación entre distintos puntos. En los polos, los rayos solares inciden oblicuamente, provocando un calentamiento menor en la superficie, en el caso del Ecuador la radiación es perpendicular la cual provoca un mayor calentamiento en la zona

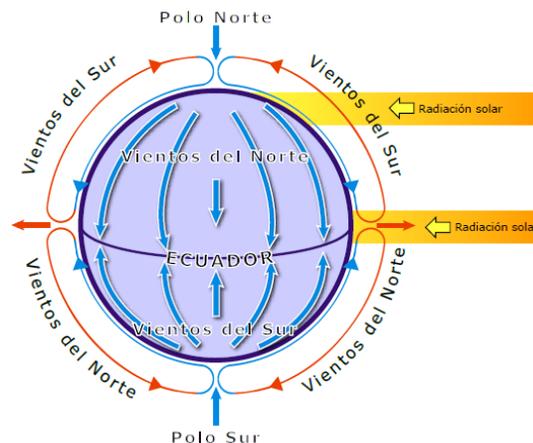


Figura 6. Comportamiento del aire, debido a la reacción con la radiación solar.

“Como se genera el viento”. Imagen tomada del sitio. <http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenido/s/docpdf/capitulo20.pdf>.

(Fecha de actualización 01 de febrero del 2014).

(figura 6). Estas diferencias dan lugar a distintas zonas térmicas que provocan variaciones en la densidad de las masas de aire. Es decir el sol al calentar los volúmenes de aire, produce un incremento de la presión atmosférica y con ello el desplazamiento de esas masas a zonas de menor presión, el resultado de ese movimiento, son los vientos.

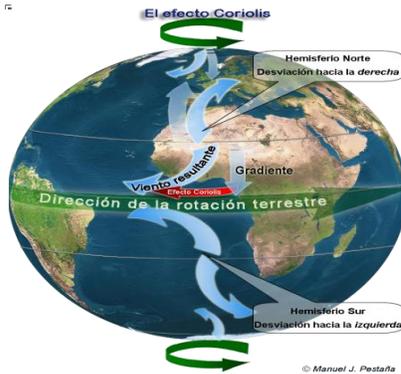


Figura 7. Se representa el movimiento del viento a causa de la fuerza de Coriolis.

“El efecto coriolis”. Imagen tomada del sitio.

<http://recursosghfernandoj.blogspot.mx/2013/10/ventolera.html>.

(Fecha de actualización 01 de febrero del 2014).

Debe señalarse, que de no ser por la acción del efecto de la fuerza de Coriolis, ocasionada por la rotación de la Tierra, el movimiento de los vientos, describiría siempre el mismo circuito, es decir: en las regiones alrededor del ecuador (a 0° de latitud), el aire caliente (más ligero que el frío) subiría hasta alcanzar una altura aproximada de 10 km, para luego distribuirse hacia el norte y hacia el sur, alcanzando de esta manera los respectivos Polos. Después descendería para volver nuevamente al ecuador, cerrando de esta forma el circuito.

De acuerdo con lo anterior, es posible la presencia de los vientos en cualquier región del planeta, debido a que el viento en el hemisferio norte es desviado hacia la derecha y en el hemisferio sur a la izquierda (figura 7), creándose así los vientos que dominan en ciertas latitudes.

Entonces la combinación del efecto de Coriolis y los gradientes de presión creados por la transferencia de calor hacia los polos produce los vientos dominantes en cada hemisferio (figura 8). A partir del ecuador y hasta los 30° de

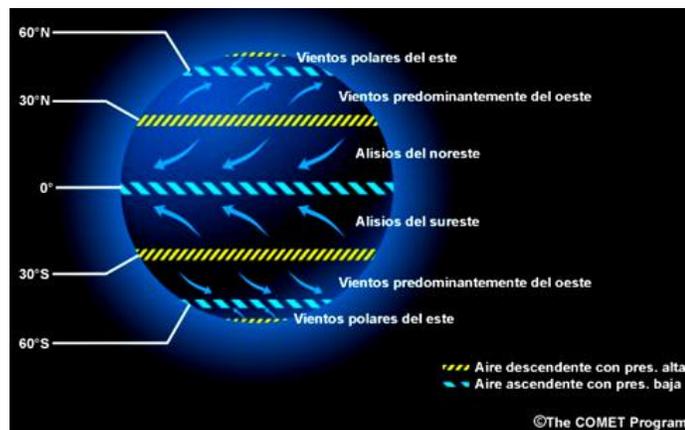


Figura 8. Representación de los vientos dominantes en el planeta producidos por la combinación de la fuerza de coriolis y diferencias de presiones.

“Vientos dominantes” Imagen tomada del sitio.

http://www.meted.ucar.edu/fire/s290/unit7_es/navmenu.php?tab=1&page=3.2.0.

(Fecha de actualización 16 de febrero del 2014).



latitud, dominan los *vientos alisios* del noreste, entre los 30 a 60° de latitud, los vientos del oeste y abarcando de los 60° de latitud al polo, los vientos polares del este.

Por otro lado, en la circulación global del aire sobre el mundo intervienen dos factores: el primero debido al movimiento de traslación de la Tierra, el cual condiciona la intensidad de la radiación solar, así como las perturbaciones atmosféricas para las diferentes regiones del mundo según la estación del año y el segundo, debido a la composición de la Tierra en océanos o continentes, lo que provoca diferente calor específico.

Respecto a los vientos que interaccionan sobre los continentes, estos se clasifican en: geostróficos y terrestres, su asignación dependen de la altura en la que se originan. Los vientos geostróficos o globales son aquellos que se encuentran a una altitud de 1000 metros a partir del suelo, tienen la característica de no ser influenciados por la superficie de la tierra, se crean, principalmente por las diferencias de presión y temperatura. Los vientos terrestres o locales son los que están afectados por el contacto con el área terrestre hasta una altura de 100 metros, tienen la particularidad de ser frenados por la rugosidad y los obstáculos que posee el terreno.

Para el desarrollo de esta investigación, es más importante conocer las características de los vientos terrestres, que nos permitan calcular la energía aprovechable del viento. Teniendo esto en cuenta, éstos pueden distinguirse en **vientos inducidos térmicamente**, por orografía o vientos generales, ambos influenciados por los efectos climáticos locales.



Figura 9. Se ilustra la brisa marina durante el día, en donde el viento sopla del mar a la tierra debido al calor que se genera en esta.

“Brisas Marinas”. Imagen tomada del sitio. <http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/cursos/contenidos/docpdf/capitulo20.pdf>.
(Fecha de actualización 01 de febrero del 2014).



Figura 10. En este dibujo se representa el ciclo de la Brisa marina durante la noche, donde el aire sopla de la tierra al mar

“Brisas Marinas”. Imagen tomada del sitio. <http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenido/s/docpdf/capitulo20.pdf>.
(Fecha de actualización 01 de febrero del 2014).

amanecer (*figura 10*) el viento sopla hacia el mar, ya que la tierra se enfría más rápidamente que éste.

Los vientos valle-montaña, se producen por un proceso parecido. Unas laderas reciben más insolación que otras, en función de su pendiente y orientación. Estos vientos soplan durante toda la noche desde la montaña al valle y desde el valle a la montaña durante el día (*figura 11*). Las brisas son vientos de poca velocidad aunque alcancen en ciertos sitios hasta los 13 m/s.

Los vientos Inducidos por la orografía dependen del obstáculo y su orientación. El aire que se desplaza en la proximidad de la superficie terrestre debe sortear los innumerables obstáculos que encuentra a su paso, cambiando en mayor o menor medida sus características.

De acuerdo a lo anterior los vientos tienen distinto origen o naturaleza según la escala geográfica en la que se desarrollen. Macro-escala: 1000 km. Movimientos debido al calentamiento desigual de la superficie terrestre, influido

Entre los vientos inducidos térmicamente pueden señalarse las brisas marinas que se originan como consecuencia a los distintos calores específicos y la diferente velocidad de calentamiento y enfriamiento del mar y la tierra.

Se generan debido a que durante el día (*figura 9*), la tierra se calienta más rápidamente que el mar, haciendo que el viento sopla del mar a la tierra (mediodía y tarde). Por la noche y el

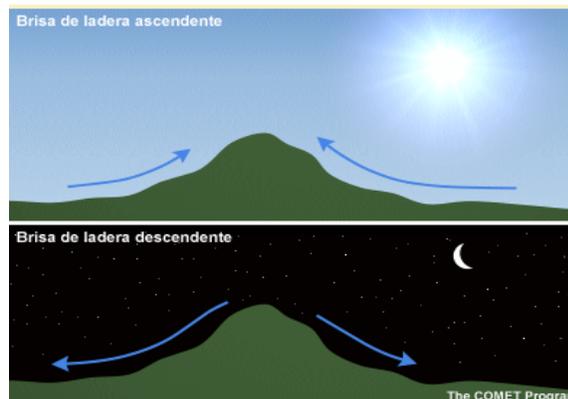


Figura 11. Comportamiento del viento a través de laderas durante en el día como en la noche.

“Viento valle montaña”. Imagen tomada del sitio. http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/mtnval_es/print.htm.
(Fecha de actualización 01 de febrero del 2014).

por la aceleración de Coriolis y el rozamiento con la corteza (vientos alisios y de poniente), meso-escala: 10-500 km. (brisas marinas, vientos de valle montaña), micro-escala (perturbaciones debida a obstáculos).

1.3 PODER DEL VIENTO.

La velocidad del viento es importante por la cantidad de energía que puede generar. Dada la naturaleza del viento, éste tiene variaciones continuas en su velocidad y dirección, sobre todo debido a factores como las condiciones climáticas locales y las características de la superficie.

Variaciones de la velocidad debido a condiciones climáticas locales.

Como ya hemos tratado anterior mente debido a la distribución geográfica, los vientos sufren diversas variaciones estacionales derivadas de la acción de la radiación solar, por lo que se han detectado tendencias de variaciones de velocidad en función de las estaciones del año (*figura 12*), por ejemplo: en zonas templadas los vientos de verano son generalmente más débiles que los de invierno.

Así mismo en la mayoría de los lugares del planeta el viento sopla más fuerte durante el día que durante la noche Este comportamiento es conocido como variaciones diurnas, y son debidas a las diferencias de temperatura, .por ejemplo, entre la superficie del mar y la superficie terrestre, son mayores la velocidad del viento durante el día que durante la noche.

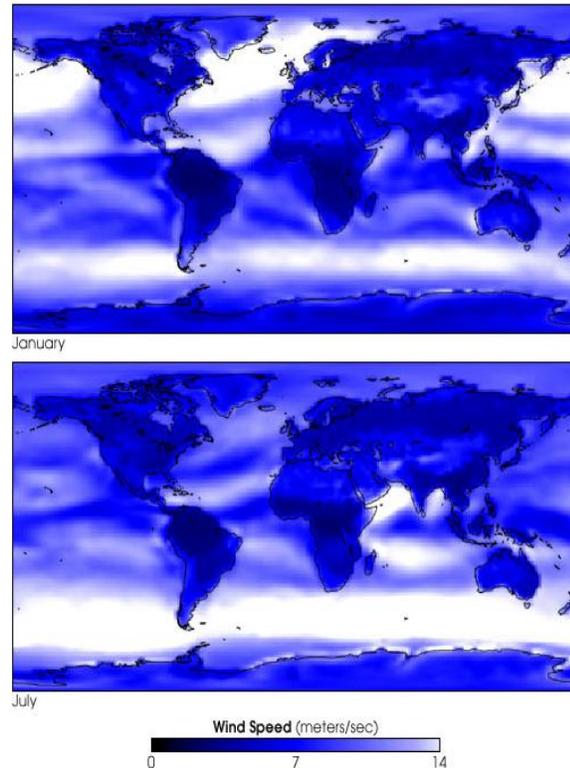


Figura 12. Mapa en el que se exhiben las variaciones del viento para distintos meses del año.

“Velocidad del viento en la superficie de la Tierra”. Imagen tomada del sitio. http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5d/Wind_speed_climatology.jpg.

(Fecha de actualización 13 de febrero del 2014).

Variaciones de velocidad onshore.

A una altura alrededor de un kilómetro a partir del suelo, la superficie de la tierra apenas ejerce influencia sobre el viento. Sin embargo, en las capas más bajas de la atmósfera, las velocidades del viento se ven afectadas por la fricción con el área terrestre en la cual se distinguen agentes como *la rugosidad del terreno, la influencia de obstáculos y la orografía.*

a) Rugosidad del terreno

En las capas próximas al suelo, la velocidad del viento disminuye, dicha variación o gradiente de velocidad con respecto a la altura depende esencialmente de la *rugosidad del terreno*, cuanto más pronunciada sea la rugosidad, el viento experimentara una disminución de su velocidad. Superficies lisas como espejos de agua, terrenos llanos sin arbolado o llanuras nevadas producen un gradiente suave, al contrario que superficies con gran rugosidad como edificaciones urbanas, terrenos muy irregulares o superficies boscosas (*figura 13*).

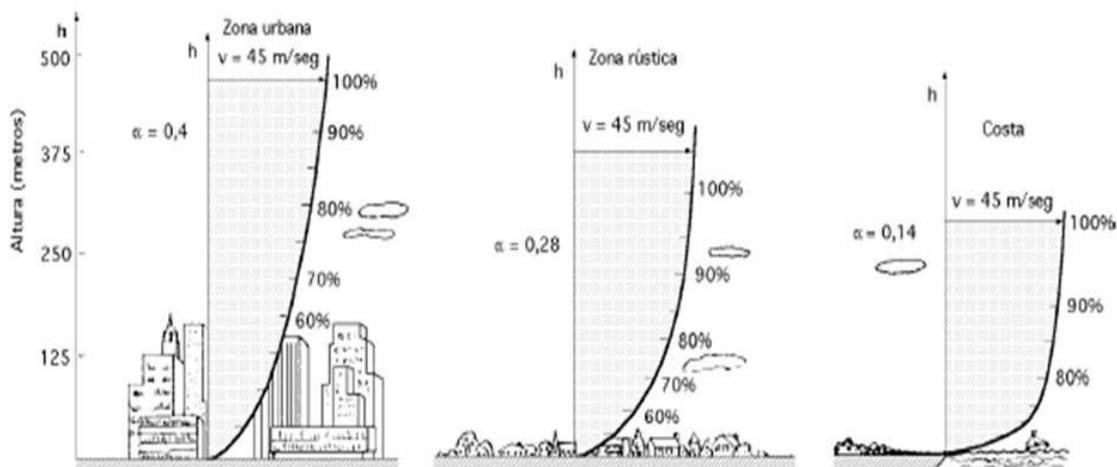


Figura 13. En esta imagen se visualizan los distintos perfiles verticales de la velocidad del viento para diferentes clases de rugosidad del terreno.

“Variación de la velocidad del viento con la altura sobre el terreno” Imagen tomada del sitio. <http://www.energiasargentinas.com.ar/velocidad%20del%20viento.htm> .
(Fecha de actualización 15 de febrero del 2014).

Para evaluar la velocidad del viento a una cierta altura sobre el nivel del suelo, puede emplearse la expresión (1).

$$V = V_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

donde:



$V=$ Velocidad del viento a una altura H sobre el nivel del suelo, en m/s.

$V_0=$ Velocidad de referencia (ya conocida a una altura H_0), en m/s.

$H=$ Altura sobre el nivel del suelo para la velocidad deseada V , en m.

$H_0=$ Altura de referencia (altura a la que conocemos V_0), en m.

$\alpha=$ Exponente que caracteriza la clase de rugosidad del terreno (consultar Tabla 1)

Clase de rugosidad	α	Longitud de rugosidad m	Índice de energía (%)	Tipo de paisaje
0	0.08-0.10	0,0002	100	Superficie del agua
0,5	0.10-0.12	0,0024	73	Terreno completamente abierto con una superficie lisa, p.ej., pistas de los aeropuertos, césped cortado, etc.
1	0.12-0.15	0,03	52	Área agrícola abierta sin cercados y con edificios muy dispersos. Sólo colinas suavemente redondeadas
1,5	0.15-0.17	0,055	45	Terreno agrícola con algunas casas y arbustos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 1250 m.
2	0.17-0.19	0,1	39	Terreno agrícola con algunas casas y arbustos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 500 m.
2,5	0.19-0.21	0,2	31	Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 250 m.
3	0.21-0.24	0,4	24	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola, con muchos o altos arbustos resguardantes, bosques y terreno accidentado y muy desigual
3,5	0.24-0.28	0,8	18	Ciudades más grandes con edificios altos
4	0.28-0.35	1,6	13	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos

Tabla 1. Clasificación del terreno en función de su rugosidad.

Se define al parámetro longitud de rugosidad como la altura respecto al nivel del suelo, donde la velocidad del viento es nula. Y en función de este valor se puede clasificar el terreno en distintas clases de rugosidad, las cuales se muestran en la *Tabla 1*. El hecho de que el perfil del viento se mueva hacia velocidades más bajas conforme nos acercamos al nivel del suelo suele llamarse cizallamiento del viento.

b) Influencia de los obstáculos.

Los obstáculos tales como edificios, arbolados, o accidentes del terreno, provocan en general dos efectos desfavorables: una disminución de la velocidad del viento y un aumento de las turbulencias (*figura 14*). Las zonas de turbulencia pueden alcanzar una altura 3 veces mayor a la del obstáculo y se presentan comúnmente en la parte posterior del obstáculo, donde hay flujos de aire muy irregulares, con remolinos en los alrededores (*figura 15*).

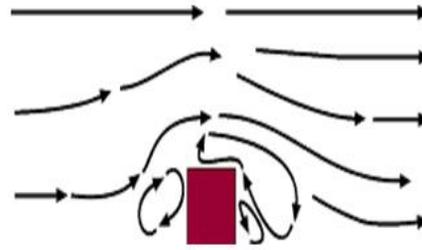


Figura 14. Se puede observar el efecto de un obstáculo sobre el perfil vertical de la velocidad del viento.

“Comportamiento del viento a través de un obstáculo”. Imagen tomada del sitio. <http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dge/publicaciones/uso/1/01/02/08/es/tour/wres/obst.htm>. (Fecha de actualización 15 de febrero del 2014).

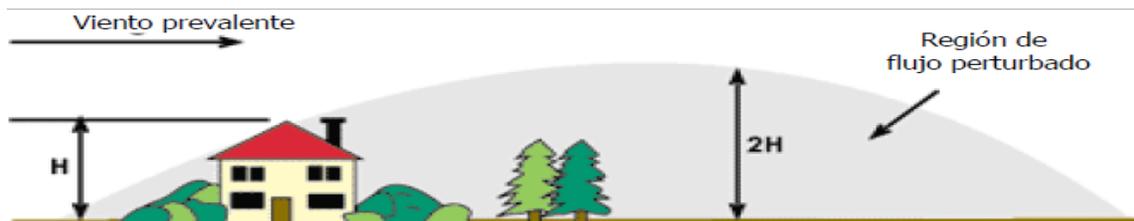


Figura 15. Representación de zona de perturbación y turbulencia originada por edificios y árboles

“Zona de flujo turbulento tras edificio”. Imagen tomada del sitio. <http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dge/publicaciones/uso/1/01/02/08/es/tour/wres/obst.htm>. (Fecha de actualización 15 de febrero del 2014).

c) Orografía de la zona

El relieve del terreno influye sobre la velocidad del viento. Las elevaciones, tales como montañas, colinas y acantilados, pueden ocasionar un aumento de velocidad (acelerar) si el perfil es de forma y pendiente suave o pueden disminuir la velocidad (frenar) si se trata de fuertes pendientes, crestas o bordes agudos.

En el aprovechamiento de la energía eólica son utilizados los efectos

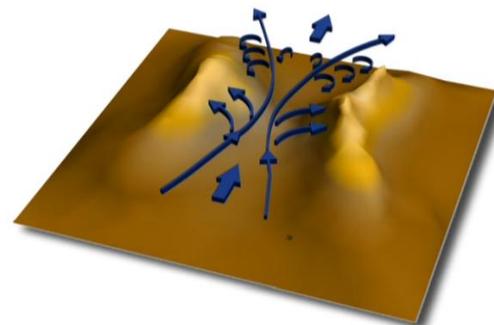


Figura 16. Aquí se observa la distribución del viento cuando atraviesa las montañas

“Flujo de aire entre zonas montañosas”. Imagen tomada del sitio. <http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo20.pdf>. (Fecha de actualización 01 de febrero del 2014).

aceleradores como el efecto túnel y el efecto colina.

Efecto túnel

Si la distribución orográfica es tal que hay dos zonas montañosas próximas (*figura 16*), el flujo de aire se ve obligado a penetrar por un estrecho canal. El teorema de Bernoulli establece que la velocidad de un fluido aumenta cuando la sección por la que pasa disminuye. Por tanto, en estos casos, como la sección por la que discurre el viento es mucho más estrecha que fuera y las líneas de corriente están muy próximas, la velocidad aumenta.

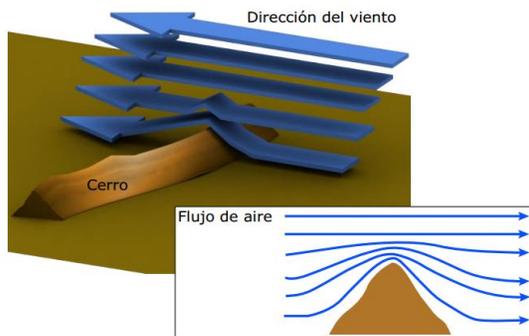


Figura 17. Comportamiento del aire sobre colina.

“Flujo de aire en un obstáculo montañoso”. Imagen tomada del sitio <http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/cursos/contenidos/docpdf/capitulo20.pdf>.
(Fecha de actualización 01 de febrero del 2014).

Efecto colina

En las colinas, siempre se aprecian velocidades de viento superiores a las de las áreas circundantes. Esto es debido a que el viento es comprimido en la parte de la montaña que da al viento, y una vez que alcanza la cima vuelve a expandirse al descender hacia la zona de bajas presiones por la ladera (*figura 17*).

Variaciones de velocidad offshore.

En el caso de los aprovechamientos eólicos en zonas marinas, las velocidades del viento no son fuertemente afectadas por la fricción con la superficie de agua.

a) Rugosidad del mar.

La superficie del mar, es obviamente muy lisa, por lo que la rugosidad de su superficie se considera baja, sin embargo, con velocidades crecientes del viento, parte de la energía que éste posee, se emplea en producir oleaje, lo que implica un aumento en el valor de la rugosidad (*figura 18*). Pero toda vez que ya se han formado las olas, se ha observado que el valor de la rugosidad, decrece de nuevo. Por lo tanto, la superficie del mar, ante tales cambios, se considera como una superficie de rugosidad variable. No obstante, se puede considerar que la rugosidad de la superficie del agua de mar, es muy baja y que los obstáculos que hay en él (islas o faros) son pocos.

b) Cizallamiento del viento.

Con una baja rugosidad, el cizallamiento del viento en el mar es también muy bajo, lo que implica que la velocidad del viento no experimente grandes cambios al variar la altura.

c) Turbulencia

El viento en el mar es generalmente menos turbulento que en la tierra, esto se debe ante todo, al hecho de que las diferencias de temperatura a diferentes altitudes de la atmósfera que hay sobre

el mar son inferiores a las que hay sobre tierra. La radiación solar puede penetrar varios metros bajo el mar, mientras que en la tierra la radiación solar solo calienta la capa superior del suelo, consecuentemente las diferencias de temperatura entre la superficie y el aire serán menores sobre el mar, esto es lo que provoca que la turbulencia sea menor.



Figura 18. Comportamiento del viento en el mar, produciendo distintas magnitudes de olas lo que implica variaciones significativas en su rugosidad.

“Crecimiento de las olas en una zona de alcance al viento”.
http://www.meted.ucar.edu/marine/mod2_wlc_gen_e_s/print.htm.

(Fecha de actualización 06 de febrero del 2014).

Medición del viento.

Existen instrumentos de medida necesarios para la medición del viento los cuales nos proporcionan datos para el estudio en el aprovechamiento de la energía eólica (*figura 19*).



Figura 19. Representación de dispositivos, para medir las características del viento.

“Medición del viento” Imagen tomada del sitio. <http://www.abc.es/blogs/tiempo/public/post/metodos-para-medir-el-viento-15814.asp>.

(Fecha de actualización 02 de febrero del 2014).

Para medir las velocidades del viento se utilizan aparatos llamados anemómetros, de estos dispositivos existen multitud de tipos y modelos, sin embargo, el más utilizado es el nombrado de cazoletas para medir la dirección se

emplea, frecuentemente, dispositivos denominados veletas, para medir la temperatura ambiental del aire son utilizados los termómetros y para medir la presión atmosférica ambiental se utilizan los barómetros Estos aparatos registran las variaciones del viento en un periodo determinado de tiempo ya sea en horas, días o años (*figura 20*).

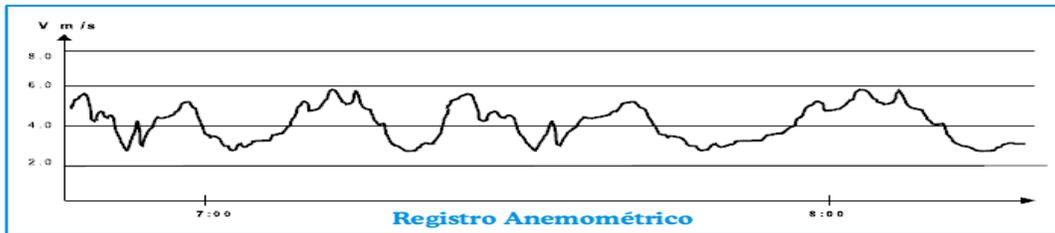


Figura 20. Registro anemométrico de las variaciones de velocidad del viento en un periodo determinado de tiempo.

“Registro anemométrico”. Imagen tomada del sitio. http://www.cnea.gov.ar/pdfs/boletin_energetico/13/eolica1.pdf. (Fecha de actualización 25 de febrero del 2014).

Si no se dispone de instrumental, se puede emplear la escala de Beaufort, (*Tabla 2*), que es un buen procedimiento para su medición indirecta, ya que cada grado de la escala comprende un intervalo de velocidades.

Grados Beaufort	Velocidad del viento a 10 m de altura						Descripción	Presión sobre superficie plana en daN/m ²	
	Nudos		m/s		km/h			de	a
	de	a	de	a	de	a		de	a
0	<	1	0	0.2	<	1	Calma
1	1	3	0.3	1.5	1	3	Ventolina	0	0.3
2	4	6	2.1	3.1	7.4	11.1	Brisa Suave	0.6	1.2
3	7	10	3.6	5.1	13	18.5	Brisa Leve	2	3
4	11	16	5.7	8.2	20.4	29.7	Brisa Moderada	4	9
5	17	21	8.8	10.8	31.5	38.9	Viento Refrescante	10	15
6	22	27	11.3	13.9	40.8	50	Viento Fuerte	17	25
7	28	33	14.4	17	51.9	61.2	Viento muy Fuerte	27	38
8	34	40	17.5	20.6	63	74.1	Temporal	40	55
9	41	47	21.1	24.2	76	87.1	Temporal Fuerte	58	76
10	48	55	24.7	28.3	89	101.9	Temporal muy Fuerte	79	104
11	56	63	28.8	32.4	103.8	116.8	Tempestad	108	137
12	64	71	32.9	36.5	118.6	131.6	Huracán	141	174
13	72	80	37.1	41.2	133.4	148.3	Ciclón	179	220
14	81	89	41.7	45.8	150.1	164.9		226	273
15	90	99	46.3	51	166.8	183.5		279	338
16	100	108	51.5	55.6	185.3	200.1		344	402
17	109	118	56.1	60.7	202	218.7		409	480

Tabla 2. Escala Beaufort

Representaciones de los datos.

Dependiendo del método de medición y el posterior tratamiento de las medidas, en la práctica se pueden encontrar varias formas de presentación de los datos del viento.

La representación gráfica más usada es la denominada **rosa de los vientos** donde se puede mostrar la información sobre las distribuciones de velocidades, la variación de las direcciones, variación de la rugosidad del terreno, basándose en observaciones. La gráfica viene dividida en 360° (figura 21). El cálculo se realiza tomando como origen el norte y contando los grados en el sentido de giro del reloj, utilizando barras o extensiones que van desde el centro de un círculo hacia un punto determinado que ilustra la dirección del viento, la longitud de cada extensión indicará el porcentaje de tiempo en el que el viento se dirigió hacia esa dirección.

Estas mediciones pueden presentarse ya sea en forma gráfica o tabular. Los datos se muestran en ocho direcciones primarias: N (norte), S (sur), E (este), W (oeste), NE (nordeste), NW (noroeste), SE (sudeste), SW (suroeste) y ocho secundarias: NNE (nor noreste), ENE (este noreste), SSE (sud sudeste), SSW (sud suroeste), WSW (oeste suroeste), WNW (oeste noroeste), NNW (nor noroeste). La rosa de los vientos se emplea para trazar un mapa de la cantidad de energía procedente de las diferentes direcciones.

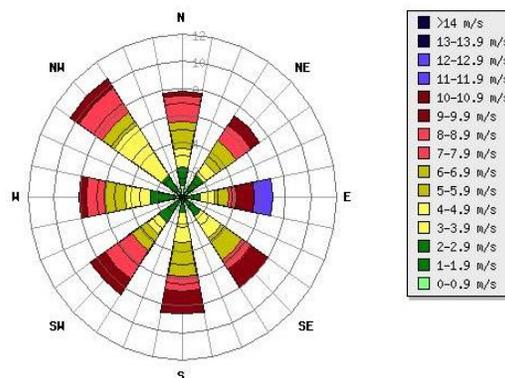


Figura 21. Modelo de una rosa de los vientos, donde se muestran las diferentes velocidades y direcciones que se pueden determinar en observaciones meteorológicas. .

“Rosa de los vientos”. Imagen tomada del sitio <http://kip289.blogspot.mx/2012/10/rosa-de-los-vientos-en-php-con-jpgraph.html>.
(Fecha de actualización 10 de febrero del 2014).

Otra forma gráfica de representar los datos obtenidos es el **histograma**, en el cual se reflejan las variaciones de la velocidad del viento y la frecuencia con las que se presentan, en cierto periodo de tiempo.

La **distribución Weibull** es una función que se utiliza para predecir la variación del viento de un lugar específico, hace posible la descripción del comportamiento de la velocidad del viento y también permite estimar la producción



de energía para un lugar específico. La función dada por Weibull, describe la densidad de probabilidad de velocidades medias de viento que corresponde a una familia de curvas. Analíticamente su expresión es la siguiente:

$$p(v) = ckv^{k-1}e^{-cv^k} \quad (2)$$

donde:

$p(v)$ = Función densidad de probabilidad Weibull.

v = Velocidad del viento, en m/s.

c = Factor de escala, en m/s (valor próximo a la velocidad media) se calcula con la expresión (4).

k = Factor de forma que caracteriza la asimetría de la función de probabilidad.

El parámetro de escala c , determina la velocidad promedio del viento en el lugar, es decir, está vinculado con la velocidad media; dato necesario para estimar la energía del viento que está en función del parámetro de forma k . Este último, indica el grado de dispersión de los registros, es decir, la simetría o no de la distribución de la velocidad media. Los valores que toma el factor k están influenciados por la morfología del terreno y por el régimen de vientos en el lugar (tabla 3).

Factor de forma K	Morfología del terreno	Régimen de vientos
1.2-1.7	Lugares montañosos	Muy variable
1.8-2.5	Grandes llanuras-collinas	Variable
2.5-3.0	Campo abierto	Bastante regular
3.1-3.5	Zonas costeras	Regular
3.5-4	Islas	Muy regular

Tabla 3. Valores de K para distintas morfologías del terreno

De tal manera que valores cercanos a 1 corresponden a distribuciones muy asimétricas, mientras que valores elevados ($k > 2-3$) corresponden a distribuciones simétricas, similares a las de Gauss⁵. Concretamente, cuanto mayor sea el valor de k , menor será la dispersión en torno al valor medio.

⁵ Para $k = 1$ se tiene la distribución exponencial, mientras que para $k = 2$ se tiene la distribución de Rayleigh, que puede usarse para estimaciones aproximadas cuando solo se disponga de la velocidad media.

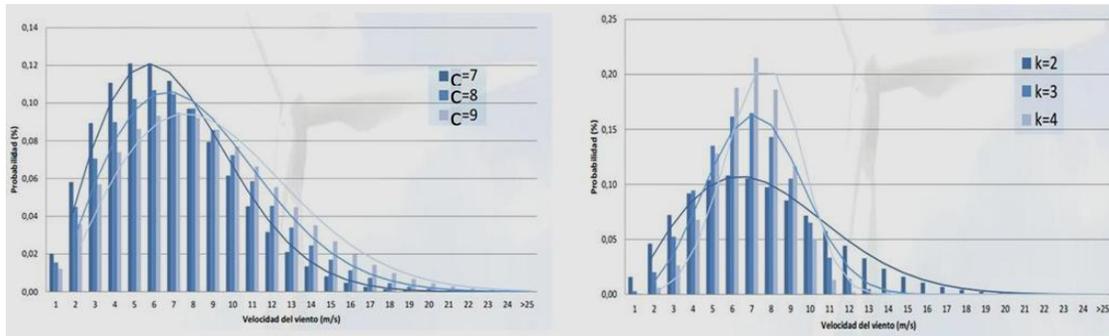


Figura 22. Gráficas donde se visualiza el comportamiento de la distribución de Weibull al variar los factores K y C.

“Distribución Weibull”. Imagen tomada del sitio http://www.luqentia.es/hosting/masterenergiasrenovablesumh/material/Energ%C3%ADa%20E%C3%B3lica/II%20Master%20Energ%C3%ADa%20Solar%20y%20Renovables-T3_Medici%C3%B3n%20y%20tratamiento%20de%20los%20datos%20viento.pdf.
(Fecha de actualización 11 de febrero del 2014).

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, con los parámetros c y k se puede establecer la frecuencia con la que se manifiesta una velocidad determinada en cierto lugar (*figura 22*), se evalúan con el método de *máxima probabilidad* el cual proporciona las siguientes ecuaciones que permiten determinar su valor.

$$K = \left(\frac{\sum_{i=1}^N V_i^k \ln(V_i)}{\sum_{i=1}^N V_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^N \ln(V_i)}{N} \right)^{-1} \quad (3)$$

$$C = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^k \right)^{\frac{1}{k}} \quad (4)$$

donde:

N = Numero de observaciones.

V_i = Velocidad del viento promedio registradas un intervalo de tiempo, en m/s.

La mayoría de los lugares en los que se dan las condiciones adecuadas para la explotación de la energía eólica, presentan en general distribuciones de velocidad que son próximas a distribuciones de Weibull, razón por la que es utilizada para ajustar los datos (*figura 23*).

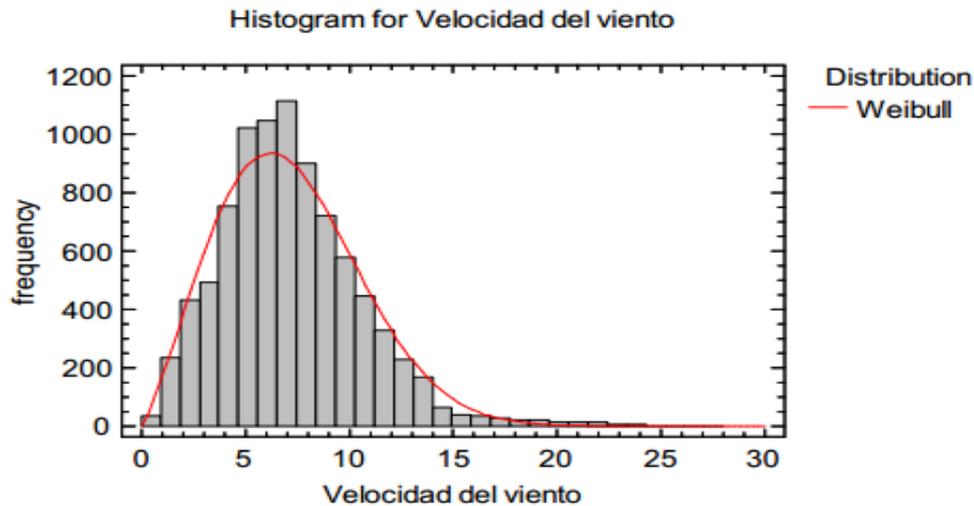


Figura 23. Grafica donde se representa un histograma y su adaptación a la distribución de Weibull.

“Histograma”. Imagen tomada del sitio <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/48dccb305025a.pdf>.
(Fecha de actualización 10 de febrero del 2014).

Potencia eólica

La potencia eólica disponible es la máxima potencia que podríamos extraer al viento si pudiésemos convertir toda su energía cinética en energía útil. En la práctica por limitaciones de distinta índole sólo permite aprovechar en el mejor de los casos un 40% de la potencia eólica disponible.

Teóricamente la potencia que existe en una corriente de aire a través de un área viene dada por la ecuación (4).

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (4)$$

donde:

P = Potencia del viento, en Watts.

ρ = Densidad del aire, en kg/m^3 .

A = Superficie de contacto, en m^2 .

V = Velocidad del viento en m/s .

La necesidad de combatir el cambio climático global, ha motivado en gran medida a la expansión de la energía eólica, al evitar la emisión de dióxido de carbono, sin producir ningún contaminante como en el caso de los derivados del petróleo.

En la actualidad el aprovechamiento de la energía eólica en el mundo, es fundamental en países desarrollados⁶, tanto en el aspecto de servicios públicos, como también para la economía de un país en general.

1.4 RECURSO EÓLICO EN MÉXICO.

En nuestro país el potencial eólico no ha sido evaluado de manera exhaustiva y por lo tanto no ha sido posible a gran escala el aprovechamiento del viento como recurso adicional energético que apoye a la producción actual de energía eléctrica. Sin embargo, el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos ha definido zonas, en regiones específicas de la República Mexicana, susceptibles de ser capaces de generar energía eólica y que se muestran en el siguiente mapa (*figura 24*).

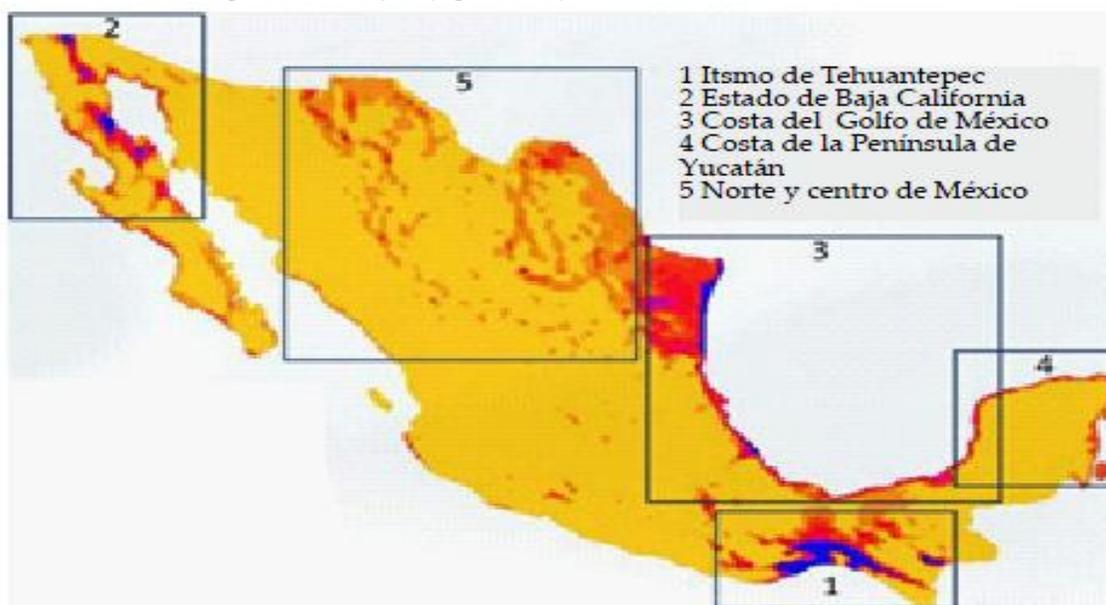


Figura 24. Mapa donde se muestran las zonas con máximo potencial eólico en la república mexicana.

“Zonas Potenciales para el desarrollo de proyectos de energía eólica en México”. Imagen tomada del simulador ERRIEE. <http://sag01.iie.org.mx/eolicosolar/Default.aspx>. (Fecha de actualización 03 de febrero del 2014).

1. Región del **Istmo de Tehuantepec**, ubicada en el estado de Oaxaca, con excelentes condiciones de viento lo que la hace ser una de las zonas más privilegiadas en México y en el mundo. Aquí se halla la mayoría de los

⁶ China, Estados Unidos, Alemania, España e India son los mercados líderes en la generación de energía eólica en el mundo.

parques eólicos del país, cuenta con 1,248 MW en operación, además, de ocho proyectos en construcción que suman un total de 1,251 MW.

2. Territorio de La **Rumorosa** enclavado en el estado de Baja California tiene un potencial de más de 5,000 MW. Actualmente, existen cuatro proyectos en operación y construcción que suman una capacidad instalada de 258 MW.
3. Costa del Golfo de México, demarcada por los estados de Tamaulipas y Veracruz, cuenta también con proyectos en operación y en construcción por un total de 477 MW.
4. En la franja de la Costa de la Península de Yucatán, el estado de Quintana Roo, específicamente la isla de Cozumel cuenta con excelentes corrientes de viento.
5. En la división Norte y Centro de México, únicamente al norte el estado de Nuevo León posee 274 MW que se prevé entren en operación a más tardar en este 2014 y al centro el estado de San Luis Potosí tiene en construcción una central eólica de 200 MW de capacidad.

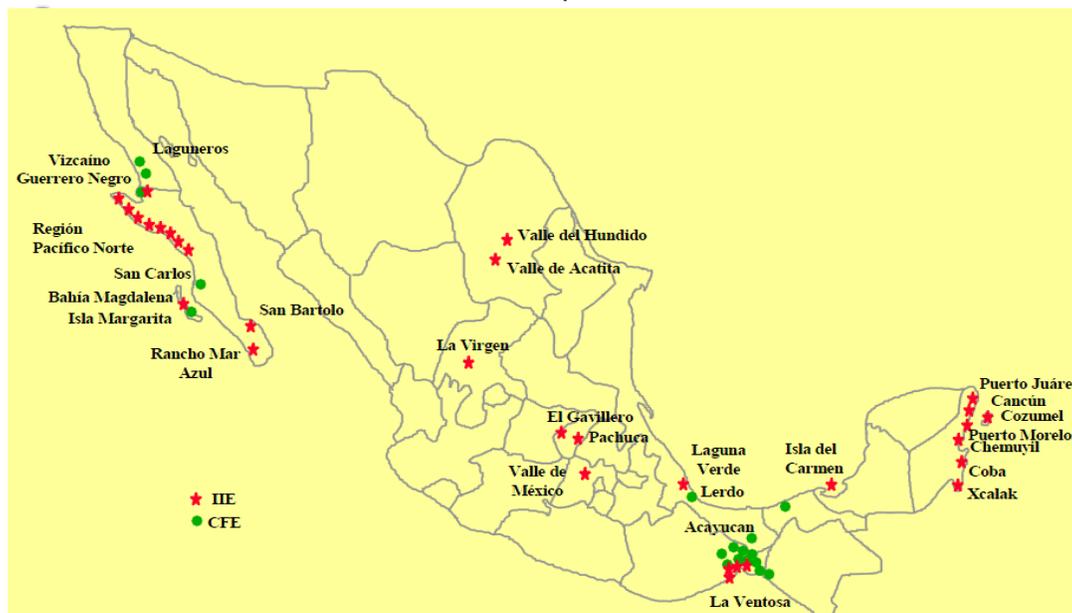


Figura 25. Mapa de la república se muestran los diferentes puntos donde se instalaron anemómetros por parte de CFE y IIE.

“Sitios con información anemométrica recabada por el IIE y CFE”. Imagen tomada del sitio <http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/Presentaciones/Viento.pdf>. (Fecha de actualización 03 de febrero del 2014).

Como parte del proyecto “Plan de acción para eliminar barreras en el desarrollo de la generación Eoloeléctrica en México”, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) ha instalado anemómetros en diversos puntos del

país (*figura 25*) y ha encontrado potenciales significativos en varios de ellos, está previsto que la Comisión Federal de Electricidad realizará una evaluación y junto con la información disponible de otras fuentes, permitirá contar con un mapa eólico nacional.

CRECIMIENTO ACTUAL DEL DESARROLLO EÓLICO.

A pesar de que el primer proyecto eólico se materializó en México en 2006, no fue sino hasta el 2009, que nuestra industria despegó. Ya para el 2010 se contaba con una capacidad instalada de 519 MW y al cierre del 2011, la capacidad alcanzó los 569 MW (*figura 26*), con esto el país se posicionó en el lugar 24^o a nivel mundial en términos de capacidad instalada (*figura 27*).

LO QUE SE ESPERA.

Actualmente, se posee 2 mil megawatts de energía eléctrica en 25 parques eólicos, suficiente para iluminar todas las casas de Colima y Campeche.

La Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE), espera que este año (2014) comiencen a operar en el país seis parques eólicos que tendrán una capacidad de más de 714 MW, también pronostica que en los siguientes 12

años, los parques eólicos de todo el país podrían generar el 12 por ciento de la demanda eléctrica a nivel nacional y, con ello, un ahorro de 10 mil millones de toneladas de emisiones de bióxido de carbono a la atmósfera.

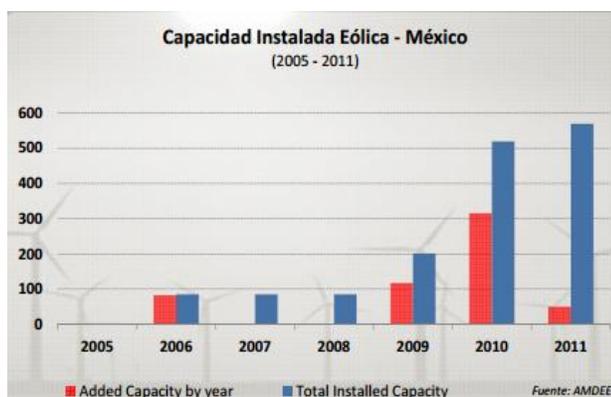


Figura 26. Grafica donde se caracteriza el crecimiento de la energía eólica en México (2005-2011).

“Capacidad instalada eólica México (2005-2011)”. Imagen tomada del sitio http://www.inecc.gob.mx/descargas/eventos/ensenanza_rio20_pgs_pgottfried.pdf. (Fecha de actualización 05 de febrero del 2014).

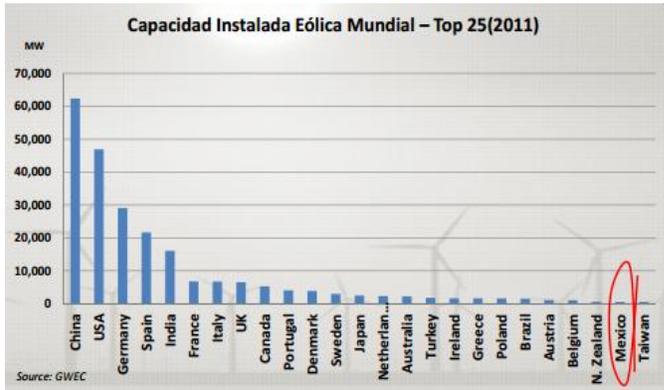


Figura 27. Grafico donde se representa el lugar donde se posiciona el país a nivel mundial en desarrollo de energía eólica (2005-2011).

“Capacidad instalada eólica Mundial (2005-2011)”. Imagen tomada del sitio http://www.inecc.gob.mx/descargas/eventos/ensenanza_rio20_pres_pgottfried.pdf. (Fecha de actualización 05 de febrero del 2014).

El interés por este tipo de energía ha llevado al gobierno a diseñar una política pública para aprovechar el potencial eólico en cualquier punto del Sistema Eléctrico Nacional donde se encuentren las condiciones favorables para su desarrollo. En el Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico (POISE) de la Comisión Federal

de Electricidad (CFE) contempla que para 2026 habrá en la obra pública un financiamiento de 1500 MW destinados al servicio público.

*“El tiempo es como el viento, empuja y genera cambios”
Mario Benedetti*

CAPITULO II

TURBINAS EÓLICAS

Imagen obtenida del sitio <http://www.tecmovia.com/2011/08/16/C2%BF100-energia-eolica-la-planta-de-motores-ford-en-dagenham/>



CAPITULO II

TURBINAS EÓLICAS

2.1. BREVE RESEÑA HISTORICA.

AÑO	ACONTECIMIENTO
3000 a.c.	El hombre usa por primera vez la energía del viento en Egipto, para propulsar barcos de vela.
2000 a.c.	Hammurabi usaba molinos de viento para irrigación.
Siglo VI.	Las primeras máquinas eólicas se utilizaban para moler granos y bombear agua.
Siglo XII	Europa aparecen los primeros, estructuras de madera o piedra, que se hacían girar a mano alrededor de un poste central para levantar sus aspas al viento.
1854	Halladay introduce en EU un molino de viento multipala.
1888	Brush construye la que se cree es la primera turbina eólica para la generación eléctrica, tenía un diámetro de rotor de 17 m y 144 palas fabricadas en madera. A pesar del tamaño, el generador era solamente de 12 kW., funcionó como cargador de baterías.
1890	Poul La Cour diseñó aerogeneradores con rotores de baja solidez de 4 y 6 aspas que operaban a velocidades relativamente altas.
1945	La compañía Danesa F.L. Smidth construyó varios aerogeneradores bi y tripala, el diseño de tres aspas se conoce como el "Concepto Danés".
1980-1981	Fueron desarrollados la generación de aerogeneradores <i>Nordtank</i> de 55 kW.
2005	Existencia de generadores que producen más de 5MW y grandes parques eólicos instalados en zonas con gran potencial eólico.



Figura 28. Línea del tiempo en donde se observa la evolución de los aerogeneradores.

El “Concepto Danés” (tres aspas, eje horizontal), es el que se ha mantenido en el mercado y ha sido adoptado por la gran mayoría de los desarrolladores y fabricantes de aerogeneradores. Con base en este concepto básico, han surgido una gran cantidad de modelos y continúan en proceso de mejora tecnológica (figura 28).

2.2. DEFINICIÓN Y ELEMENTOS CONSTITUTIVOS.

Una turbina eólica (aerogenerador) es un sistema mecánico, constituido por un conjunto de elementos agrupados, capaz de tomar la energía cinética del viento y transformarla en energía eléctrica, para ser usada directamente o almacenada para su empleo posterior. Existen varios tipos de turbinas y cada una puede tener diferentes componentes, dependiendo de la aplicación; sin embargo, se constituyen esencialmente por 3 piezas: **rotor, góndola y torre** (figura 29).

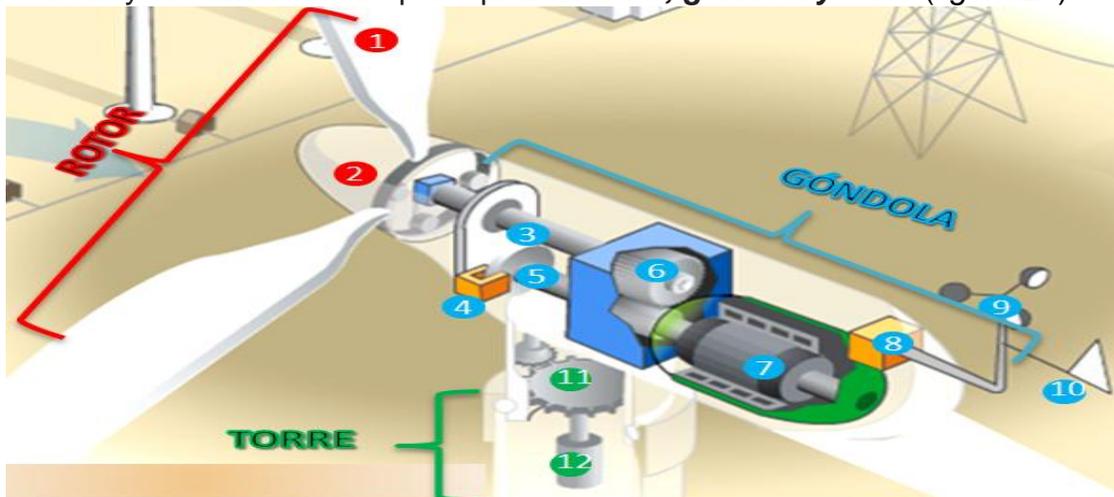


Figura 29. Componentes de un aerogenerador. “Partes e una turbina eólica”. Imagen tomada del sitio <http://energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work>. (Fecha de actualización 28 de febrero del 2014)

ROTOR

1. Aspas.
2. Buje.

GONDOLA

3. Eje de baja velocidad.
4. Freno de disco.
5. Eje de alta velocidad.
6. Multiplicador.
7. Generador.
8. Controlador.
9. Anemómetro.
10. Veleta.

TORRE

11. Unidad guía.
12. Motor guía.

ROTOR.

Elemento compuesto por aspas y buje, es el corazón de la turbina eólica, ya que transforma la energía cinética del viento en mecánica. Existe una variedad de rotores y su clasificación más usual está en función del eje en el que se colocan las aspas, por lo que éste puede ser horizontal o vertical (figura 30), de los cuales el primero es el más común, aunque puede variar en tamaño, afectando



Figura 30.Tipos de aerogenerador según la orientación de su eje.

“Aerogeneradores según su eje” .Imagen tomada del sitio <http://www.mailxmail.com/curso-energia-eolica/aerogeneradores-tipos-primera-parte/> (Fecha de actualización 13 de marzo del 2014).

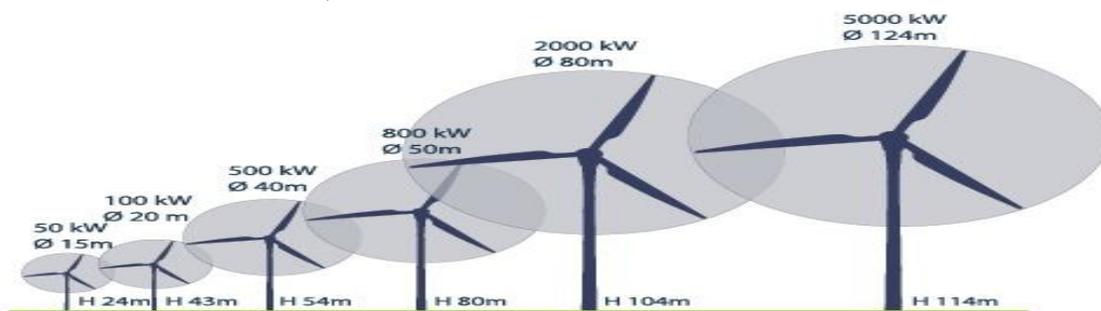


Figura 31.Observece que a mayor diámetro del rotor hay un mayor aprovechamiento de energía.

“Diámetros de rotor” .Imagen tomada del sitio <http://www.terramagnetica.com/2009/08/01/why-are-wind-turbines-getting-bigger/> (Fecha de actualización 13 de marzo del 2014).

especialmente a la cantidad de energía que se puede generar (*figura 31*).

1. Aspas.

También conocidas como hélices o palas (*figura 32*), son una parte imprescindible y fundamental en las que se recibe directamente la energía del viento, por lo que deben resistir grandes cargas debidas a éste, además de transmitir la energía cinética del viento al buje. Generalmente la turbina cuenta con dos o tres aspas cuyo tamaño comercial oscila entre los 25 y 50 metros y pueden pesar más de 900 kg cada una. Los materiales utilizados en su fabricación son



Figura 32. Se aprecia las dimensiones y forma de las aspas de un aerogenerador “Aspas de aerogenerador”. Imagen tomada del sitio http://www.altenerg.com/back_issues/index.php-content_id=338.htm.

(Fecha de actualización 28 de febrero del 2014).

el acero, el aluminio y en los últimos años poliéster o resina epóxica reforzado con fibra de vidrio o fibra de carbón. Su diseño es muy parecido a las alas de un avión.

2. Buje.



Figura 33 Exposición interior del buje donde se observan los mecanismos de unión para las palas.

“Buje”. Imagen tomada del sitio <http://www.evwind.es/2012/09/06/enercon-to-launch-2-5mw-low-wind-turbine-at-husum-windenergy-2012/23001>.

(Fecha de actualización 28 de febrero del 2014).

Une las palas con el sistema de rotación y forma el centro del rotor, al cual se fijan las aspas (*figura 33*). El buje se fabrica de hierro o acero fundidos. Puede ser de tipo rígido o basculante. En el rígido el conjunto de aspas se atornilla al buje y este se fija rígidamente al eje de giro. Se usa más en los

rotore de tres palas, en los que el rotor está mejor equilibrado. Los bujes basculantes se emplean para reducir las cargas que se producen sobre él. Este tipo se emplea más en los rotore bipalas, ya que el pivoteo hace que se equilibren las cargas en cada revolución.

La mayoría de los fabricantes usan el buje rígido; debido a que esto lo hace más resistente, reduce el número de componentes móviles que pueden fallar y es relativamente fácil de construir.

GÓNDOLA.

También denominada chasis, es una cubierta que protege los componentes de la máquina de las inclemencias del tiempo y reduce el ruido de los mismos, impidiendo que se transmita a través del aire. Al mismo tiempo, incorpora las aberturas necesarias



Figura 34. Vista de los componentes al interior de la góndola así como también el personal de mantenimiento en su interior

“Góndola”. Imagen tomada del sitio <http://www.electrosector.com/suministrara-repower-954-mw-al-mercado-eolico-canadiense/>. (Fecha de actualización 01 de marzo del 2014).

para lograr una ventilación efectiva. La parte superior de la cubierta puede abrirse hacia los lados para permitir al personal de servicio permanecer de pie en ella, así como para el montaje y desmontaje de componentes, sin necesidad de bajar la turbina al suelo (*figura 34*). Para acceder al cubo del rotor, y a los cojinetes de las palas, existe una escotilla en el extremo delantero de la cubierta.

3. .Eje de baja velocidad.

Es la pieza que conecta el buje del rotor al multiplicador, contiene tubos para el sistema hidráulico que permiten operar a los frenos. Gira muy lento, aproximadamente como a 30 rpm.

4. Freno de disco.

Los frenos mecánicos, típicamente frenos de disco, se colocan normalmente en el eje de alta velocidad, a la salida del multiplicador forma parte del sistema de orientación y sirve para detener el aerogenerador en caso de algún inconveniente, o bien para realizarle mantenimiento.

5. Eje de alta velocidad.

Es el eje que gira aproximadamente a 1500 revoluciones por minuto y maneja el generador eléctrico, está provisto con un freno de disco para emergencias.

6. Multiplicador.

Conocido también como caja de engranes, es el dispositivo que acopla las bajas velocidades de giro del rotor con las altas velocidades del generador para el funcionamiento del aerogenerador.

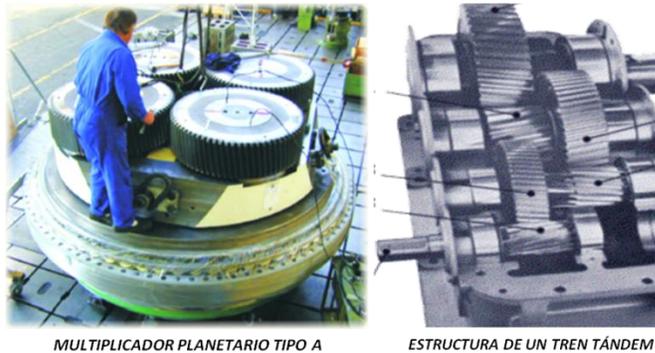


Figura 35. Se visualizan los trenes de engrane que constituyen un multiplicador.

“Multiplicador planetario y tren tándem”. Imagen tomada del sitio <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia36/HTML/articulo03.htm>. (Fecha de actualización 05 de marzo del 2014).

La relación de transmisión del multiplicador está determinada por su tren de engranajes, compuesto por ruedas dentadas cilíndricas de ejes paralelos, cuyos dientes al engranar vinculan sus frecuencias de rotación. Los diseños actuales se basan en dos tipos de trenes de engranaje básicos: el planetario A y el tándem (*figura*

35).

7. Generador.

Es el dispositivo que convierte la energía mecánica en energía eléctrica. Existen dos tipos de generadores, a saber el asíncrono y el síncrono. Los *asíncronos* son los que se emplean con mayor frecuencia, ya que pueden conectarse directamente a la red, son más robustos y de menor mantenimiento. Los más usuales son el *doblemente alimentado* y el de *jaula de ardilla* (*figura 36*). El primero consta de un generador asíncrono de rotor bobinado, que se conecta a un convertidor de frecuencia electrónico,

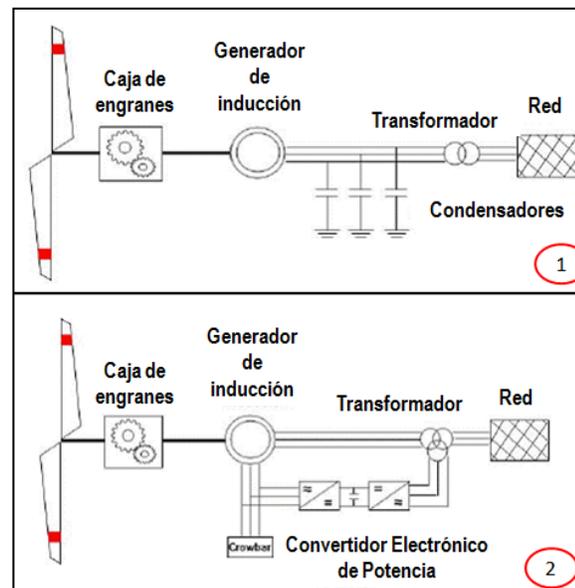


Figura 36. Generadores asíncronos, (1) conexión de generador de inducción jaula de ardilla (2) conexión de generador doblemente alimentado

“Generadores”. Imagen tomada del sitio <http://web.ing.puc.cl/~power/alumno10/wind/index12.html>. (Fecha de actualización 06 de marzo del 2014).

el cual cumple el papel de intermediario entre la máquina y la red, esta configuración permite variaciones de giro en las máquinas, por estas razones, este tipo de configuración es una de las más utilizadas actualmente. En el caso del asíncrono jaula de ardilla, este está integrado por una máquina de inducción de rotor de jaula de ardilla conectado mediante un convertidor electrónico a la red, esta conexión presenta como ventajas, su robustez, fiabilidad y bajo costo en comparación con la de rotor bobinado.

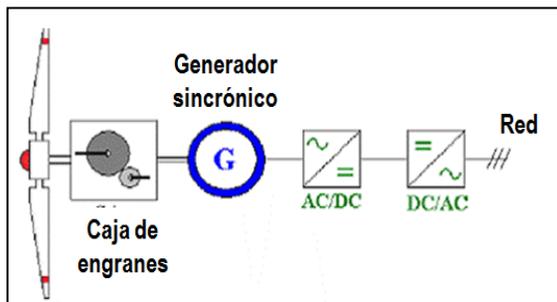


Figura 37. Conexión de generador síncrono de velocidad variable.

“Generadores”. Imagen tomada del sitio <http://web.ing.puc.cl/~power/alumno10/wind/index12.html>.
(Fecha de actualización 06 de marzo del 2014).

Los generadores síncronos se caracterizan por la relación entre la velocidad de giro y la frecuencia de las tensiones y corrientes generadas, lo que condiciona que la velocidad del rotor debe ser constante e igual a la velocidad de sincronismo. Debido a la necesidad de tener una velocidad de giro constante, es que estos generadores no se conectan

directamente a la red, si no que se usa un convertidor electrónico como intermediario entre el generador y la red (*figura 37*), esta desventaja de tener que utilizar un complicado sistema adicional para la sincronización se compensa con una mayor eficiencia de la turbina y una mejor compatibilidad con la red.

8. Controlador.

Es el que pone a la turbina en la dirección del viento, mantiene un voltaje de salida constante ante los cambios de velocidad, son coordinados y monitoreados por una computadora, se puede tener acceso a ellos desde una ubicación remota.

9. Anemómetro.

Es un aparato para medir las velocidades del viento, el más usado es el

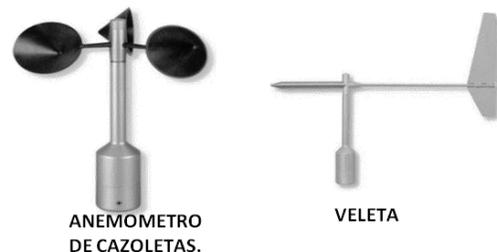


Figura 38. Instrumentos de medición de velocidad y dirección del viento.

“Sensores de control”. Imagen tomada del sitio <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia36/HTML/articulo03.htm>.
(Fecha de actualización 06 de marzo del 2014).



de cazoletas, el cual tiene un eje vertical y tres cazoletas que capturan el viento, el número de revoluciones por segundo son registradas electrónicamente. En un aerogenerador realmente sólo se utiliza para determinar si sopla viento suficiente como para que valga la pena orientar el rotor en contra del viento y ponerlo en marcha.

10. Veleta.

Este componente hace juego con el anemómetro (*figura 38*) y determina la dirección de los vientos.

11. Unidad de guía.

La orientación hacia barlovento de la turbina se efectúa por medio de la unidad guía, la cual es accionada eléctricamente y se halla en la parte delantera de la plataforma para engranar con el motor guía.

12. Motor de guía.

Motor que actúan sobre el engranaje de la unidad guía (*figura 39*) para que esta mueva la góndola a una posición óptima de dirección del viento, se encuentra atornillada en la parte superior de la torre.

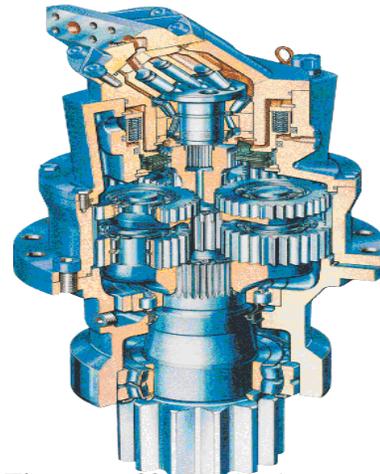


Figura 39. Acoplamiento de unidad y motor guía para la orientación de un aerogenerador.

“Sistema de orientación”. Imagen tomada del sitio

<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia36/HTML/articulo03.htm>.

(Fecha de actualización 06 de marzo del 2014).

TORRE.

Es la estructura que soporta el peso de la góndola y las aspas del rotor, así mismo absorbe las cargas causadas por las variaciones del viento.

Su altura debe ser suficiente para evitar que las turbulencias debidas al suelo, afecten a la máquina y para superar los obstáculos cercanos. El uso de torres más altas significa un costo mayor al inicio, pero éste disminuye en el período de la recuperación de la inversión, debido a que la velocidad del viento aumenta con la altura y logra generar más energía.

Su diseño suele consistir en un tronco cónico o tubular hueco de acero laminado, aunque en algunos casos son de cemento, con el diámetro de la base mayor que el de la parte superior, sobre la cual se ubica la góndola., son

estructuras muy visibles, por lo que no deben mostrar signos de corrosión durante muchos años: para ello debe escogerse un recubrimiento adecuado. Las torres se fijan al suelo mediante cimentaciones formadas por pedestales de cemento situados a cierta profundidad (*figura 40*).



Figura 40. Transporte, montaje y posición de una torre para aerogenerador.

“Torres”. Imagen tomada del sitio <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia36/HTML/articulo03.htm>.
(Fecha de actualización 10 de marzo del 2014).

2.3. PRINCIPIO FÍSICO DE FUNCIONAMIENTO.

Físicamente, el funcionamiento de una turbina eólica, se aprecia desde el momento en que las aspas del rotor giran a ciertas revoluciones por minuto como consecuencia de la acción del viento sobre ellas. Esta acción es posible, gracias a dos factores que favorecen la circulación del viento por ambas caras de las aspas, a saber: la inclinación y su forma geométrica. De tal manera, que se consigue que el viento escurra más rápidamente en la cara superior que en la inferior, originando así un empuje parcial de las aspas y como el buje las mantiene conectadas a la torre y esta a su vez al suelo, provoca que se desencadene el movimiento giratorio alrededor del eje principal de la turbina eólica (*figura 41*). Tal movimiento se amplifica en un

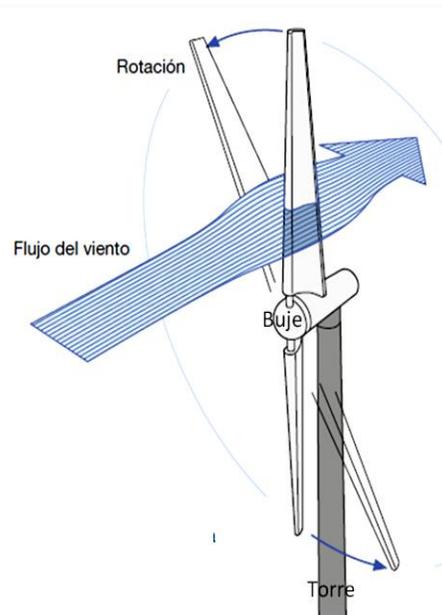


Figura 41. Observe cómo el viento provoca el movimiento en las palas por efecto de la sustentación aerodinámica.

“Sustentación aerodinámica”. Imagen tomada del sitio <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia36/HTML/articulo03.htm>.

(Fecha de actualización 20 de marzo del 2014).

mecanismo especial antes de llegar al generador, para finalmente entregar energía eléctrica a un transformador que la convierte adecuadamente para su transporte eficiente a través de cables.

En resumen, el viento que fluye sobre las aspas del aerogenerador en su paso provoca un empuje que ocasiona el giro de las mismas.

En la práctica, para que una turbina eólica arranque se necesita de un valor mínimo de viento para ejercer los rozamientos y comenzar a producir un trabajo útil. A este valor mínimo se le denomina velocidad de arranque. A partir de ese punto empezara a rodar convirtiendo la energía cinética en mecánica, hasta que alcance la potencia nominal, generalmente la máxima que puede entregar.

Una vez en la región de operación, los mecanismos activos o pasivos de regulación empiezan a actuar para evitar que la maquina trabaje bajo condiciones forzadas.

2.4. COMPORTAMIENTO HIDRAULICO.

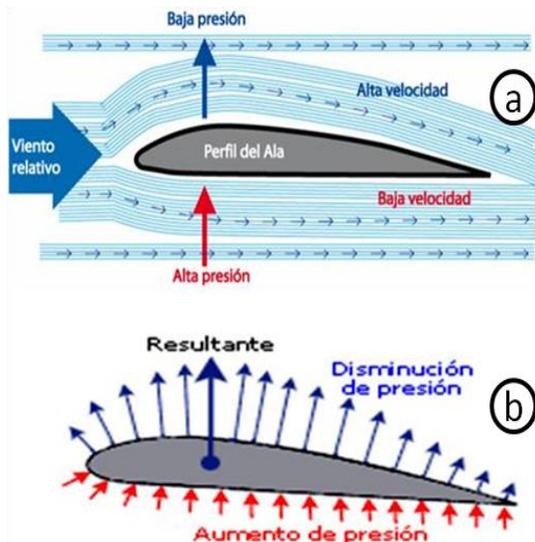


Figura 42. Comportamiento hidráulico del viento, sobre el perfil aerodinámico de las aspas, a) Se observa la diferencia de presión y velocidad. b) Se muestra la fuerza resultante concentrada en el centro de presión.

“Flujo del aire sobre la pala. Imagen tomada del sitio”
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia36/HTML/articulo03.htm>.

(Fecha de actualización 25 de marzo del 2014).

Hidráulicamente, para que una turbina eólica convierta la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación, es preciso comprender como el flujo de aire circula en las aspas del aerogenerador, modificando su velocidad y presión. Es decir, las líneas de corriente del viento en torno al perfil del aspa, transitan por ambas caras gracias

a que penetran sobre la misma debido al ángulo que posee la pala. De tal forma que por encima, las líneas de corriente se concentran, incrementan su velocidad y generan una zona de baja presión, mientras que por debajo ocurre

exactamente lo contrario: las líneas de corriente se separan disminuyendo su velocidad y consecuentemente acrecientan su presión, que produce una fuerza total aerodinámica (también conocida como Resultante) sobre la superficie del aspa que para estudios prácticos se concentra en un centro de presión entre las caras, la cual ocasiona el movimiento de la misma alrededor del buje, que se traduce en el giro del rotor (*figura 42*).

Esta reacción total aerodinámica se compone de dos fuerzas de dirección y sentido contrario denominadas de *Sustentación* y de *Resistencia*. La parte de sustentación (F_s) es la desarrollada por el aire en un perfil aerodinámico, ejercida de abajo arriba y cuya dirección es perpendicular al viento. Mientras que la de resistencia (F_r) es la acción que se opone al movimiento de un perfil en el aire y es paralela a la dirección del fluido (*figura 43*).

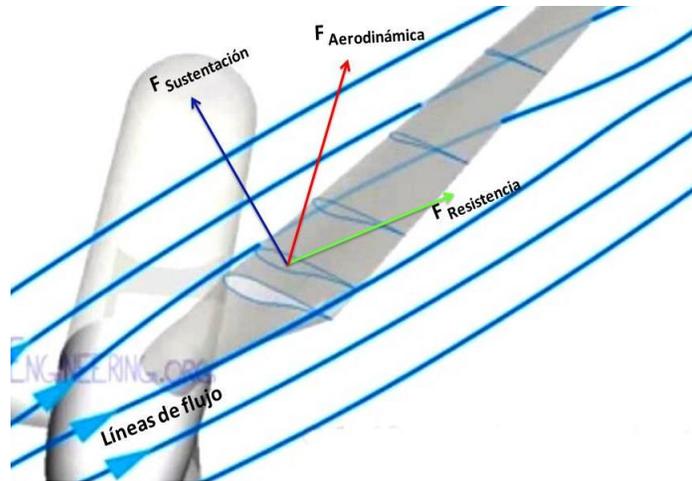


Figura 43. Se visualizan la dirección y sentido de las fuerzas que crea la energía del viento, sobre el perfil aerodinámico, las cuales hacen posible la rotación del aerogenerador.

“Fuerzas en un alerón”. Imagen tomada del sitio <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia36/HTML/articulo03.htm>. (Fecha de actualización 25 de marzo del 2014).

La sustentación y la resistencia se expresan, respectivamente, mediante las siguientes formulas:

$$F_s = \frac{1}{2} C_s \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 \quad (4)$$

$$F_r = \frac{1}{2} C_r \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 \quad (5)$$

Donde:

v = Velocidad del viento sobre el perfil, en m/s.

ρ = Densidad del aire, en kg/m³.

A = Superficie de contacto, en m².

C_s = Coeficiente de sustentación del perfil elegido, adimensional.

C_r = Coeficiente de resistencia del perfil elegido, adimensional.

Los coeficientes de sustentación (C_s) y resistencia (C_r) se expresan en función del ángulo de ataque α que es el formado entre la velocidad relativa del viento y la cuerda del perfil esto quiere decir que son características de la simetría que este posee (figura 44) y se definen con las siguientes expresiones:

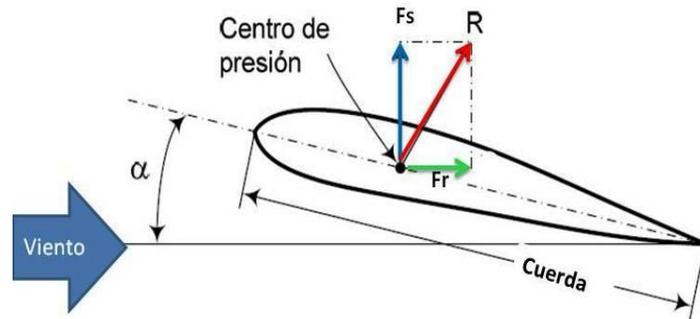


Figura 44. Simetría de perfil aerodinámico, donde se visualizan sus principales características, cuerda, ángulo de ataque, centro de presiones y las fuerzas originadas por la influencia del aire en la sección.

“Partes de un perfil” Imagen tomada del sitio http://www.uniquindio.edu.co/uniquindio/ntic/trabajos/4/c4g2heli/modelismo/s_ubpaginas/aerodinamica/fuerza.htm.
(Fecha de actualización 25 de abril del 2014).

$$C_s = \frac{F_s}{\frac{1}{2} \rho V \alpha^2 c} \quad (6)$$

$$C_r = \frac{F_r}{\frac{1}{2} \rho V \alpha^2 c} \quad (7)$$

donde:

F_s = Fuerza de sustentación, en N

F_r = Fuerza de resistencia, en N

ρ = Densidad del aire, en kg/m^3 .

α = Ángulo de ataque, en grados.

c = Cuerda característica de la asimetría del perfil.

Así mismo las características aerodinámicas de un perfil se pueden analizar en un diagrama, donde el coeficiente de sustentación se grafica en función del de resistencia o en función del ángulo de ataque. Donde generalmente C_s crece en forma aproximadamente lineal con el ángulo de incidencia hasta un valor máximo, donde cae abruptamente y por lo tanto el perfil entra en pérdida, es decir deja de sustentar y por su parte el C_r tiene un valor bajo para pequeños ángulos de ataque y aumenta en forma aproximadamente parabólica hasta la pérdida.

Por esta razón las propiedades deseables de los perfiles son elevada sustentación y baja resistencia y el parámetro para medir la calidad del perfil es la

relación S/R en especial la máxima eficiencia que puede alcanzar al variar el ángulo (figura 45).

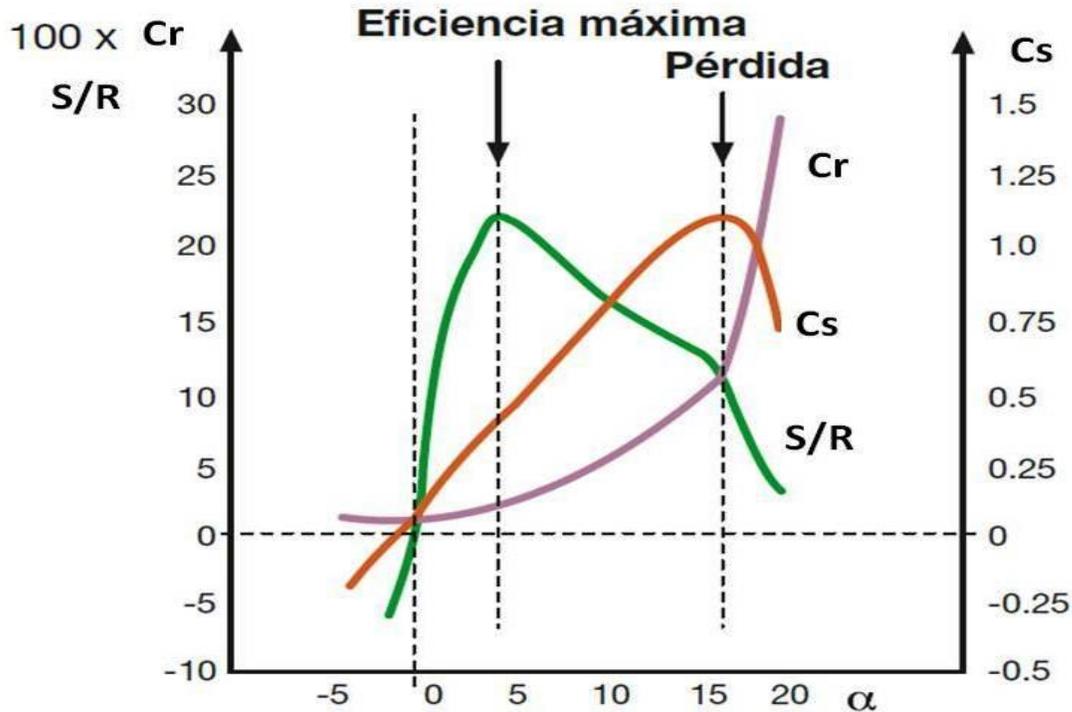


Figura 45. Grafica donde se representan las curvas de los coeficientes de Cs y Cr , en función del ángulo de ataque, así mismo se observa que en condiciones de pérdida la eficiencia del perfil se reduce considerablemente

"Grafico de coeficientes aerodinámicos". Imagen tomada del sitio [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/ac764cb1be081128c1257a30003c70d7/\\$file/Cuaderno%20Tecnico_num%2012_Plantas%20eolicas.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/ac764cb1be081128c1257a30003c70d7/$file/Cuaderno%20Tecnico_num%2012_Plantas%20eolicas.pdf).

(Fecha de actualización 5 de mayo del 2014).

2.5. ECUACIONES GENERALES DE MOVIMIENTO.

El beneficio en la producción de energía eléctrica, como consecuencia del funcionamiento de un aerogenerador, depende de la iteración de las palas del rotor con el viento, que transforman la energía cinética en energía de rotación.

La *energía cinética* E_c de cualquier masa de aire que se mueve a una velocidad constante está dada por (8):

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (8)$$



donde:

$m =$ Masa, en Kg.

$v =$ Velocidad, en m/s.

A su vez la masa de aire que se mueve por unidad de tiempo se puede expresar de acuerdo a la *ecuación de continuidad*. (9)

$$M = \rho \cdot A \cdot v \quad (9)$$

donde:

$\rho =$ Densidad del aire, en kg/m³.

$A =$ Superficie de contacto, en m².

$v =$ Velocidad del viento, en m/s.

Por lo tanto la *potencia disponible* en una corriente de aire a través de un área, es el resultado de la energía cinética por unidad de tiempo, ecuación (10).

$$P_{dis} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (10)$$

donde:

$P =$ Potencia del viento, en Watts.

$\rho =$ Densidad del aire, en kg/m³.

$A =$ Superficie de contacto, en m².

$v =$ Velocidad del viento, en m/s.

Para comprender como las turbinas eólicas extraen potencia del viento, comúnmente se hace estudio de un tubo de corriente (*figura 46*) utilizando la teoría de cantidad de movimiento, la cual consiste en colocar el aerogenerador en una situación ideal y se basa en las siguientes hipótesis:

- El conjunto de las aspas del aerogenerador equivale a un *disco poroso* de espesor nulo (disco actuador con un número infinito de palas).
- La masa de aire que fluye a través del disco permanece separada de la masa que lo rodea (tubo de flujo).

- La masa de aire fluye solo en dirección longitudinal.
- La deceleración del aire en el disco actuador se distribuye uniformemente en toda la sección del disco.
- En las secciones suficientemente lejanas aguas arriba y aguas abajo la presión es igual a la atmosférica.
- Aparte del aerogenerador, el flujo eólico no encuentra obstáculos ni antes ni después.
- El viento es estacionario y su densidad permanece constante con la altura.

Esta teoría si bien es simple y no toma en cuenta varios efectos que ocurren realmente pero sirve lo suficiente como para visualizar los principales fenómenos que se desarrollan y los variados funcionamientos del aerogenerador.

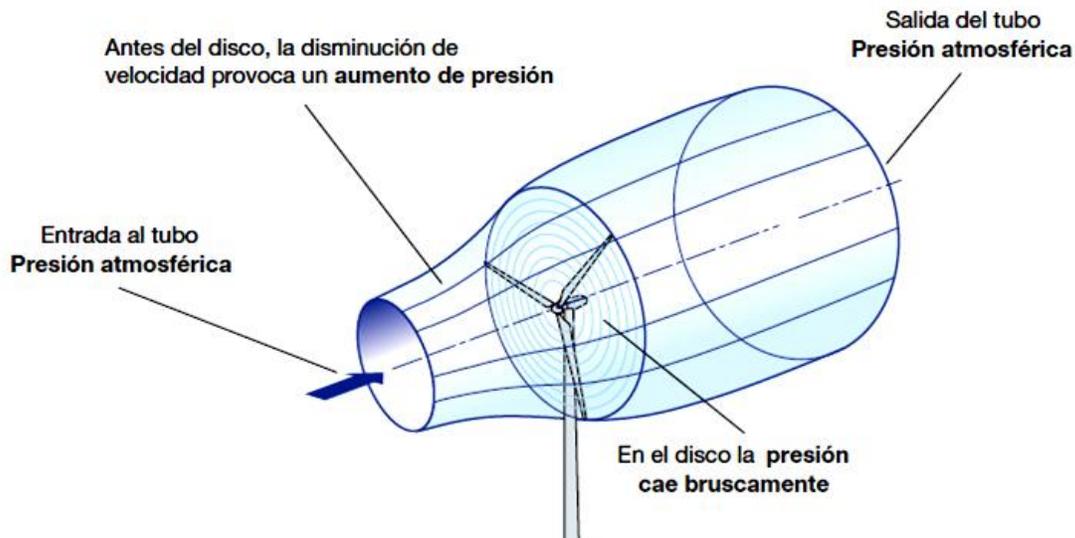


Figura 46. Se representa de forma esquemática la variación de la presión y de la velocidad a lo largo del tubo de corriente, y la diferente presión que existe entre las caras anterior y posterior del disco que originan una fuerza que tiende a reducir la velocidad del aire

“Esquema de tubo de flujo” de Betz. Imagen tomada del sitio. [http://www.05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/ac764cb1be081128c1257a30003c70d7/\\$file/Cuaderno%20Tecnico_num%2012_Plantas%20eolicas.pdf](http://www.05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/ac764cb1be081128c1257a30003c70d7/$file/Cuaderno%20Tecnico_num%2012_Plantas%20eolicas.pdf).

(Fecha de actualización 20 de mayo del 2014).

Dado que el volumen de aire que entra al tubo debe ser el mismo que el volumen de aire que sale, el aire ocupará una mayor sección transversal, ya que el

rotor actúa de barrera del viento dentro del tubo de flujo, de igual manera el rotor debe frenar el viento cuando captura su energía, implicando que el viento se mueva a menor velocidad en la entrada que en la salida del tubo. La pérdida de velocidad ocasiona que la presión aumente gradualmente a medida que el viento se acerca al rotor, esto ocasiona que la presión del aire caiga inmediatamente detrás del plano del rotor, para enseguida aumentar de forma gradual hasta el nivel de presión atmosférica (figura 46).

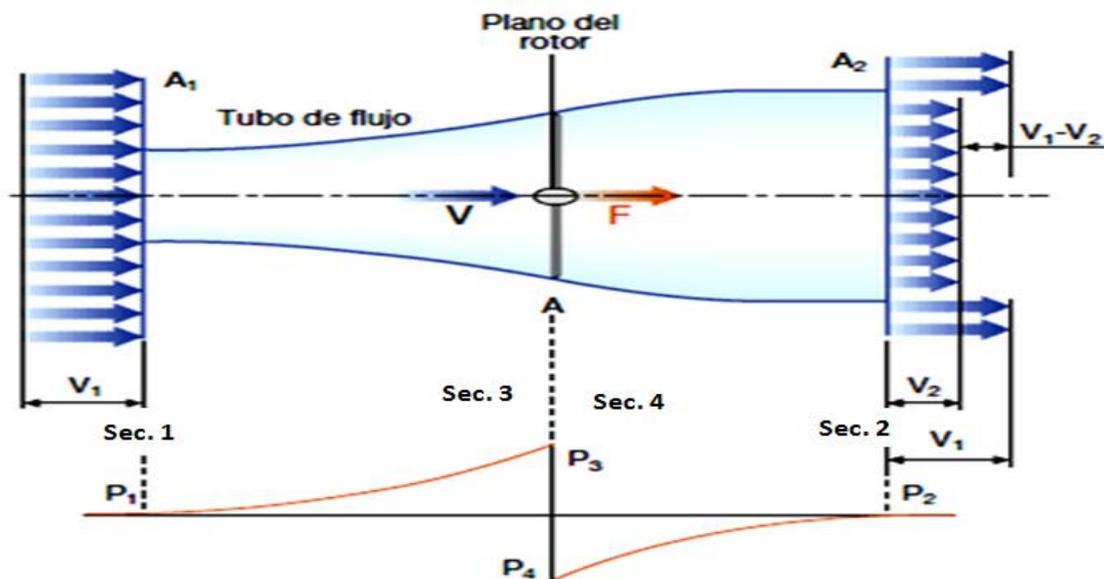


Figura 47. En esta figura se presenta un disco plano frontal a las líneas de corriente que encierran el tubo que envuelve el fluido que pasa a través del disco, desde el infinito aguas arriba (sección A1) donde la velocidad es la del viento incidente v_1 , hasta el infinito aguas abajo (sección A2) donde resulta una velocidad uniforme v_2

“Esquema de tubo de flujo de Betz”. Imagen tomada del sitio. [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/ac764cb1be081128c1257a30003c70d7/\\$file/Cuaderno%20Tecnico_nu%2012_Plantas%20eolicas.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/ac764cb1be081128c1257a30003c70d7/$file/Cuaderno%20Tecnico_nu%2012_Plantas%20eolicas.pdf).

(Fecha de actualización 20 de mayo del 2014).

Por ser el movimiento unidimensional incompresible, a lo largo de una línea de corriente es aplicable la *ecuación de Bernoulli* entre el infinito aguas arriba y la cara anterior del disco, y entre la cara posterior del disco y el infinito aguas abajo (figura 47). Es decir entre las secciones 1 y 3 se obtiene, ecuación (10).



$$P_1 + \frac{1}{2}\rho.V_1^2 = P_3 + \frac{1}{2}\rho.V_3^2 \quad (10)$$

Y entre las secciones 4 y 2, ecuación (11).

$$P_4 + \frac{1}{2}\rho.V_4^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho.V_2^2 \quad (11)$$

Operando entre las dos expresiones se obtiene, ecuación (12).

$$P_3 - P_4 = \frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_2^2) \quad (12)$$

donde:

P = Potencia del viento para cada sección, en Watts.

ρ = Densidad del aire, en kg/m^3 .

A = Superficie de contacto para cada sección, en m^2 .

V = Velocidad del viento para cada sección, en m/s .

Con lo que la fuerza que ejerce el viento sobre plano del disco está dada por la ecuación (13).

$$F_{sd} = \frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_2^2).A_d \quad (13)$$

La cual también es igual a, ecuación (14).

$$F_{sd} = (P_3 - P_4).A_d \quad (14)$$

.donde:

F_{sd} = Fuerza sobre el disco del rotor, en N .

ρ = Densidad del aire, en kg/m^3 .

A_d = Superficie del disco, en m^2 .

V = Velocidad del viento para cada sección, en m/s .

Por lo tanto se deduce que la *velocidad en el plano del disco* es la media de las velocidades aguas arriba y abajo de la corriente, ecuación (15).



$$V_d = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (15)$$

A lo largo del tubo de flujo hay una disminución de la velocidad frente al disco, y está definida por la siguiente relación (16). Conocido como *factor de inducción axial*.

$$a = \frac{V_1 - V_d}{V_1} = 1 - \frac{V_d}{V_1} \quad (16)$$

En función de este factor la velocidad en el plano del disco (V_{sd}) y la velocidad a la salida del tubo de flujo (V_2) se expresan como, ecuaciones (17) y (18).

$$V_{sd} = V_1(1 - a) \quad (17)$$

$$V_2 = V_1(1 - 2a) \quad (18)$$

Solo una parte de la potencia disponible del viento puede ser captada por el rotor. La *potencia captada* está determinada por el producto de la fuerza que el aire ejerce sobre las palas multiplicada por la velocidad a la que atraviesa el disco, ecuación (19).

$$P_c = F_{sd} \cdot V_d \quad (19)$$

Teniendo en cuenta las expresiones (15 y 16) la potencia captada también puede expresarse como, ecuaciones (20) y (21).

$$P_c = \frac{1}{4} \rho \cdot A_d (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2) \quad (20)$$

$$P_c = 2 \cdot \rho \cdot A_d V_1^3 a (1 - a)^2 \quad (21)$$

En función del *coeficiente de potencia* que indica la capacidad de la hélice para captar la energía del viento la potencia extraída estará contemplada como, ecuación (22).



$$P_c = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_d V_1^3 \quad (22)$$

El coeficiente de potencia está definido por, la relación entre la potencia extraída por el aerogenerador y la potencia disponible del viento, ecuación (23).

$$C_p = \frac{P_c}{P_{dis}} = 4 a \cdot (1 - a)^3 \quad (23)$$

Cuando $a=1/3$ la potencia captada pasa por un máximo y estará dada por, ecuación (24).

$$P_{max} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot A_d V_1^3 \quad (24)$$

Así mismo cuando $a= 1/3$ el coeficiente de potencia alcanza su valor máximo, ecuación (25).

$$C_p = \frac{16}{27} = 0.59 \quad (25)$$

Este valor es conocido normalmente como límite de Betz el cual expresa que *“la máxima potencia extraíble de una corriente de aire con un aerogenerador ideal no puede superar el 59% de la potencia del viento incidente”*.



“Cuando soplan vientos de cambio, algunos construyen muros, otros molinos”

Proverbio chino

CAPITULO III

ACOPLAMIENTO HIDRÁULICO

Imagen obtenida del sitio <http://www.panoramio.com/photo/38607984>.

CAPITULO III

ACOPLAMIENTO HIDRÁULICO.

3.1. CARACTERÍSTICAS DE UN PARQUE EÓLICO.

Un parque eólico es una zona destinada para la concentración e instalación de un conjunto de Aerogeneradores interconectados eléctricamente, que comparten una misma infraestructura de accesos y control, los cuales cumplen el objetivo de producción y distribución de energía eléctrica. El diseño característico de cada acoplamiento depende de los diferentes tipos de proyecto, sin embargo, se constituyen esencialmente por **aerogeneradores, cables conductores, subestación y red eléctrica** (figura 48).

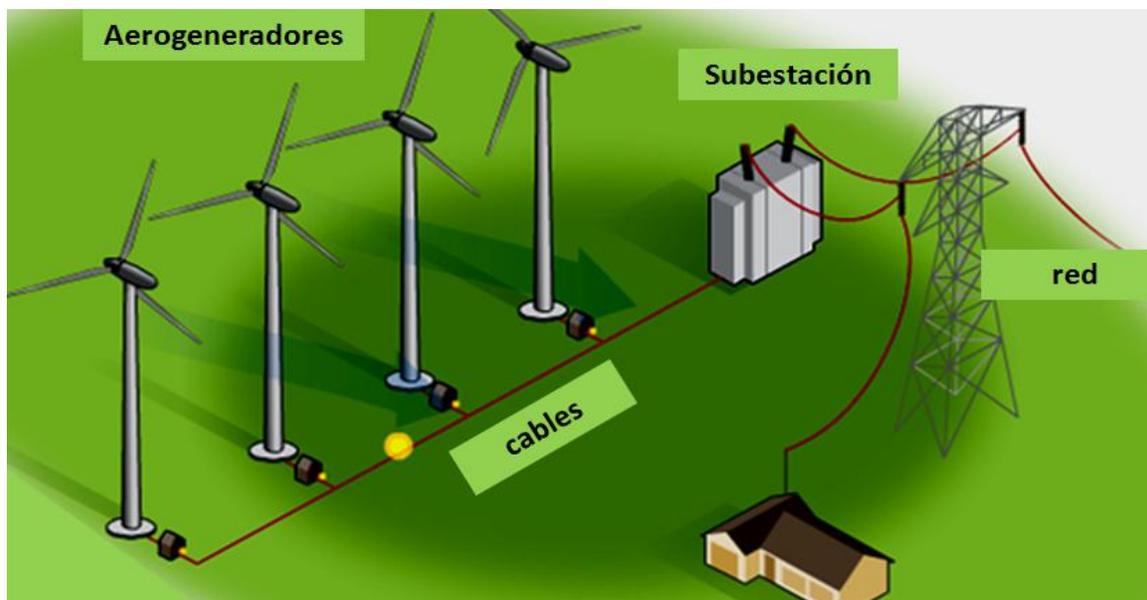


Figura 48. Representación de los elementos fundamentales que constituyen una central eólica

“Parque eólico”. Imagen tomada del sitio. <http://energy.gov/eere/wind/how-does-wind-turbine-work>.
(Fecha de actualización 03 de Junio del 2014).



Los **aerogeneradores**, como ya se ha descrito en el apartado 2.2, son máquinas por medio de las cuales, la energía cinética proveniente del viento es convertida en energía mecánica a través del giro del rotor, el cual a su vez al estar conectado a un generador transforma la energía mecánica en eléctrica.

La energía eléctrica desde el generador se transmite a lo largo de **cables conductores** subterráneos a una **subestación**. Aquí, la energía generada por las turbinas en el parque eólico se combina y se convierte para que obtenga un alto voltaje. La **red eléctrica** usa altos voltajes para transmitir la electricidad de manera eficiente a través de las líneas de energía a la población que lo necesita. Aquí, otros transformadores reducen el voltaje de vuelta a un nivel utilizable.

Para su implementación se toman en cuenta aspectos específicos como, factores correspondientes, a datos de **viento**, **terreno** disponible y consideraciones sobre los propios **aerogeneradores**.

Viento

Para la instalación de un parque eólico, en primer lugar se hace un estudio de vientos de la zona donde se pretende ubicar los aerogeneradores. Los datos necesarios se consiguen monitoreando los vientos locales frecuentemente durante un año o más con estaciones meteorológicas y mapas detallados de viento, si esto se cumple, será el inicio adecuado para un correcto estudio de factibilidad que produzca un panorama lo más preciso posible de cuánto recurso eólico está disponible en el sitio y así poder optimizar la ubicación de las turbinas eólicas.

Terreno

Aparte de contar con mediciones propias a la hora de iniciar un proyecto eólico, también es necesario la localización de zonas óptimas, para esto se recurre a planos topográficos, para así conocer las características del terreno que serán determinantes a la hora de situar los aerogeneradores o para la realización de la infraestructura eléctrica y civil. Los aspectos a tener en cuenta son: *el efecto de la rugosidad del terreno, la interferencia de obstáculos y la influencia del relieve* (factores descritos en el apartado 1.3).

Las plantas eólicas se pueden ajustar a diferentes tipos de región. Algunos hacen uso de grandes extensiones de tierra, mientras que otros ponen las turbinas a lo largo de regiones costeras o en alta mar.

Parques eólicos en Tierra (On Shore).

Las Instalaciones de turbinas en tierra se hacen generalmente en lugares de altas altitudes como llanuras, cimas de montañas, pasos entre montañas o en grandes espacios abiertos, (*figura 49*) donde el viento tiende a ser más fuerte. Esto se hace para explotar el terreno, ya que el viento acelera sobre una cresta o en la ausencia de obstáculos.



Figura 49. Instalación eólica On Shore , en zona montañosa y sin presencia de obstáculos “*Terrestrial wind farm*”. Imagen tomada del sitio. <http://www.wisegeek.com/what-is-wind-power.htm#terrestrial-wind-farm>. (Fecha de actualización 03 de junio del 2014).

Parques eólicos Cerca de la Costa (Nearshore).

La ubicación de turbinas cercanas a la costa se encuentra en tierra a tres kilómetros de una costa o dentro del mar a diez kilómetros de la tierra (*figura 50*). Estas áreas son buenos sitios para la instalación de la turbina, debido al viento producido por el calentamiento diferencial de la tierra y el mar (brisas marinas). Las velocidades del viento varían dependiendo de la dirección del viento dominante.



Figura 50. Instalación eólica, en área costera sin presencia de obstáculos

“Near shore wind farm”. Imagen tomada del sitio. <http://www.wisegeek.com/what-is-wind-power.htm#terrestrial-wind-farm>.
(Fecha de actualización 03 de junio del 2014).

Los parques eólicos marinos (Off shore)

Para zonas de desarrollo eólico marino se consideran generalmente estar a diez o más kilómetros de la costa (*figura 51*). Dado que el agua tiene menos rugosidad que la superficie de la tierra (especialmente el agua más profunda), la velocidad media del viento suele ser considerablemente más alta sobre aguas abiertas. Los factores de capacidad son considerablemente más altos que en tierra y lugares **cercanos a la costa**.



Figura 51. Parque eólico instalado en alta mar

“Near shore wind farm”. Imagen tomada del sitio. <http://www.wisegeek.com/what-is-wind-power.htm#terrestrial-wind-farm>.
(Fecha de actualización 03 de Junio del 2014).

Aerogeneradores

La influencia de los aerogeneradores en la producción eléctrica vendrá determinada por la velocidad de viento que le llega a cada aerogenerador. La energía capturada en un aerogenerador va a depender de la curva de potencia del mismo. Por ello se deberá elegir aquel cuya potencia máxima se consiga a una velocidad lo más cercana posible a la media del emplazamiento. En general la

utilización de rotores de mayor tamaño significa, la captura de una mayor cantidad de energía.

Distribución de aeroturbinas en un parque eólico.

La alineación de aerogeneradores deberá realizarse de forma que la energía captable al cabo de un año sea máxima. La formación de máquinas será tal, que los vientos que proporcionen mayor generación eléctrica anual tengan su dirección, o direcciones predominantes, perpendicular a la distribución. Cuando el emplazamiento cuenta con una gran dispersión de direcciones, con potencialidad semejante, se tendrá que cuidar especialmente la distancia entre aerogeneradores, es frecuente encontrar separaciones entre rotores comprendidas entre 1.5 y 3 veces su diámetro. En general la distancia entre turbinas dependerá de la disponibilidad del terreno y las direcciones predominantes de viento. Por ejemplo: si el terreno es llano y hay una dirección de viento dominante bien definida, los aerogeneradores se suelen disponer en filas alineadas (*figura 52*). En el caso que el terreno sea plano, pero el viento presente frecuentes cambios de dirección, se colocan al tresbolillo (así se denomina cuando un grupo de objetos se

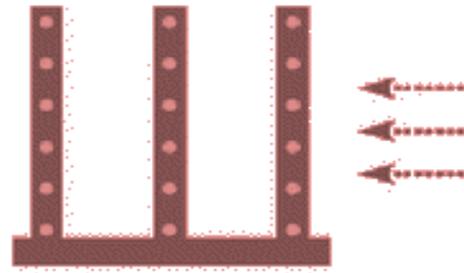


Figura 52. Esquema donde se representa la distribución típica de turbinas (puntos) cuando se presentan vientos dominantes de una sola dirección (flechas).

“Configuración del parque eólico en filas alineadas”. Imagen tomada del sitio. <http://www.wisegeek.com/what-is-wind-power.htm#terrestrial-wind-farm>. (Fecha de actualización 20 de junio del 2014).

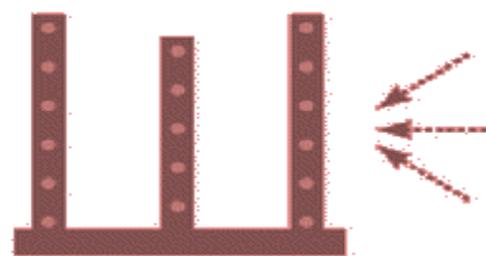


Figura 53. Representación de colocación de generadores (puntos) en terreno llano, con variaciones en la dirección de los vientos (flechas).

“Configuración del parque eólico al tresbolillo”. Imagen tomada del sitio. <http://www.wisegeek.com/what-is-wind-power.htm#terrestrial-wind-farm>. (Fecha de actualización 20 de junio del 2014).



dispone en filas paralelas, de modo que los de cada fila correspondan al medio de los de la fila inmediata) (*figura 53*).

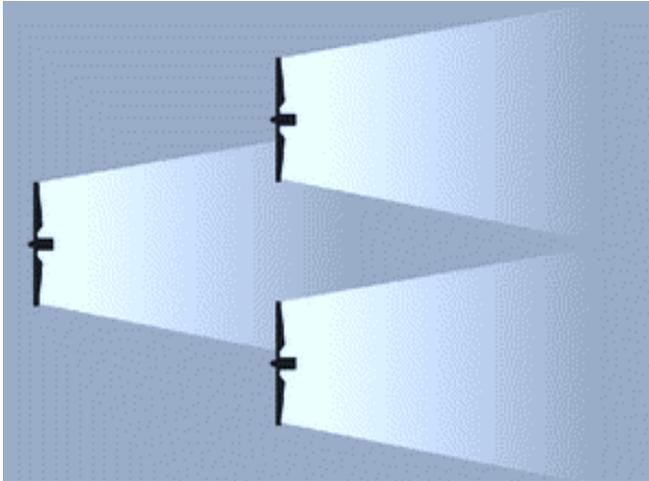


Figura 54. Vista superior donde se observa las estelas que se forman detrás de los aerogeneradores y provocan pérdidas energéticas en las centrales eólicas.

“La distribución de los aerogeneradores en un parque eólico influye en su rendimiento energético”. Imagen tomada del sitio. <http://www.wisegEEK.com/what-is-wind-power.htm#terrestrial-wind-farm>.

(Fecha de actualización 20 de junio del 2014).

Como se puede deducir, existe un espaciamiento de un aerogenerador a otro, tanto de frente al viento, en forma transversal, o en base a su dirección. Estos espaciamientos configuran la geometría del parque y determinan las pérdidas aerodinámicas de este. En estas pérdidas influye lo que se denomina la sombra que un aerogenerador provoca sobre el que le continúa (conocido también con el nombre de estela aerodinámica) por lo que debe

mantenerse una distancia mínima entre uno y otro., es decir una turbina que se encuentre detrás de otra podrá extraer menos energía por ser la velocidad menor debido a la estela que se forma. Lo expuesto ocurre en los parques eólicos donde la interferencia entre turbinas trae como resultado una disminución de la energía extraída. A este fenómeno se le conoce como pérdidas aerodinámicas del parque (*figura 54*).

Por consiguiente un espaciamiento muy cercano de las turbinas permite instalar más en el sitio, pero reducirá la energía promedio captada por cada una en el parque eólico. Las pérdidas aerodinámicas pueden reducirse optimizando la geometría del campo eólico. Diferentes distribuciones de tamaños de turbinas, la forma general, el tamaño de la distribución y el espaciamiento influyen sobre los efectos de la estela, que reduce la captación de energía, cuando existe un viento con una dirección predominante, en general se recomienda una distribución en

filas alineadas, con separación transversal (perpendicular a la del viento dominante) entre turbinas de tres a cinco veces el diámetro del rotor, y de cinco a nueve veces el diámetro del rotor en dirección del viento dominante. En el caso, de que el viento tenga frecuentes cambios de dirección con respecto a la velocidad predominante, los aerogeneradores se colocan al tresbolillo.

El cálculo de las pérdidas aerodinámicas del parque necesita del conocimiento de la ubicación, características de las turbinas y del régimen de viento, además de poseer un modelo de las estelas de las turbinas, para determinar la energía captable del parque eólico.

3.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

El uso de toda fuente energética presenta tanto ventajas como desventajas, por lo que es importante, antes de emprender una utilización, efectuar un balance entre los pros y contras que está presente.

VENTAJAS

Medioambientales

El gran beneficio que reporta el aprovechamiento del viento para la generación de energía eléctrica viene dado, en primer lugar, por los niveles de emisiones gaseosas evitados, en comparación con las fuentes de energía convencionales. Estas afectan en la producción de elementos contaminantes como el dióxido de azufre, así como a la emisión de dióxido de carbono (CO₂), que en este caso es inexistente, con lo que



Figura 55. 1. Central termoeléctrica, 2. Vista de un parque eólico, 3. energía eólica una alternativa de energía limpia.

“Energía eólica fuente de energía renovable”.
Imágenes tomadas del sitio.

<http://ecodiario.economista.es/medio-ambiente/noticias/2953268/03/11/La-energia-eolica-fue-la-primera-fuente-electrica-en-marzo.html#.Kku8ClE5nwcwHH>.

(Fecha de actualización 15 de julio del 2014).



contribuye a la estabilidad climática del planeta (*figura 55*).

Junto a este efecto positivo, presenta otras ventajas medioambientales como:

- No contribuye al agotamiento de reservas de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural), porque se trata de una energía renovable derivada del sol y por lo tanto se renueva de forma continua y es, en consecuencia, inagotable.
- La construcción de parques eólicos. no tiene un impacto tan agresivo sobre la composición del suelo, ya que no se produce ningún contaminante que incida sobre éste, vertidos o grandes movimientos de tierras ya que las obras civiles que deben realizarse son mínimas.
- No genera ningún tipo de residuos que necesite un tratamiento posterior.
- Las instalaciones son fácilmente reversibles y pueden ser retiradas sin dejar rastro.

Sociales y económicas.

El desarrollo de este tipo de energía puede reforzar la competitividad general de la industria y tener efectos positivos tangibles en el desarrollo regional, económico, y social como:

- Produce una ocupación de terreno reducida y es compatible con otras actividades (agrícolas y ganaderas) que habitualmente se dan en el área de emplazamiento (*figura 56*).
- Gracias a la energía eólica y a toda la infraestructura que conlleva, se genera un número importante de puestos de trabajo.
- La instalación de parques eólicos mejora la garantía de abastecimiento y la infraestructura eléctrica de la zona donde se implantan, además de que puede conllevar la mejora de redes de acceso y vías de comunicación (*figura 56*).

- La generación de impuestos locales por cesión de terrenos puede convertirse en uno de los principales ingresos de muchas entidades locales afectadas por la construcción de parques eólicos.



Figura 56. 1. Parque eólico con uso de actividad ganadera, 2. Vista infraestructura eléctrica de un parque eólico, 3. Vías de comunicación creadas para una instalación eólica.

"Beneficios económicos de las centrales eólicas".
Imágenes tomadas del sitio.
http://www.ucsusa.org/clean_energy/our-energy-choices/renewable-energy/environmental-impacts-of.html. (Fecha de actualización 19 de julio del 2014).

- Los terrenos más ventosos suelen tener escasa riqueza para otros usos, y en muchas ocasiones se encuentran desprovistos de vegetación. La obtención de recursos para las comunidades locales es de ordinario inesperada y no lesiona otras opciones de desarrollo.

- Los parques eólicos constituyen en la actualidad un signo de sensibilidad medioambiental y suponen una evidente acción de educación ambiental hacia el consumidor, al establecer una clara

relación entre producción y consumo, que no es percibida de igual manera con un reducido número de grandes centrales, de las que el público desconoce mayoritariamente su existencia.

DESVENTAJAS

Medioambientales

A pesar de que las ventajas medioambientales de la energía eólica son incuestionables, y de que existe un amplio consenso en nuestra sociedad sobre el alto grado de compatibilidad entre las instalaciones eólicas y el respeto por el medio ambiente, es preciso reconocer que la instalación concreta de un parque eólico puede producir impactos ambientales negativos, que dependerán,

fundamentalmente, del emplazamiento elegido. Los efectos negativos que generalmente se citan como inconvenientes de los parques eólicos son:

- El impacto visual, la instalación de parques eólicos con un gran número de aerogeneradores en cada uno de ellos puede generar una alta modificación del paisaje, por el contraste y pérdida de naturalidad que implicarían (variable según el emplazamiento), esto depende de la cercanía entre las poblaciones y las centrales eolieléctricas. Asimismo, adquiere mayor o menor dimensión dependiendo de varios factores psicológicos y sociales (figura 57).



- Consecuencias sobre la avifauna, principalmente por el choque de las aves contra las palas, así como

desconocidos sobre la modificación de los comportamientos habituales de migración y anidación (figura 54).

- Otro de las afecciones negativas es el ruido y la interferencia electromagnética que originan los aerogeneradores en funcionamiento.

No obstante, este aspecto ha dejado de ser preocupante, debido a la evolución de la tecnología eólica en este terreno.

Figura 57. 1. Impacto paisajístico de un parque eólico, 2. Vuelos de aves a través de una central eólica, 3. Muerte de ave a consecuencia de un choque con las aspas de una turbina.

"Impacto ambiental de parques eólicos". Imágenes tomadas del sitio. http://www.ucsus.org/clean_energy/our-energy-choices/renewable-energy/environmental-impacts-of.html. (Fecha de actualización 19 de julio del 2014).

Económicas.

Debido a que no es posible garantizar la constancia del viento, por obvias razones en la práctica se tiene una fuerte variabilidad de los mismos, y como



consecuencia la producción de energía eléctrica mediante sistemas eólicos, se advierte afectada respecto a los precios que introduce al mercado, en comparación con los que coloca la electricidad producida a partir de combustibles fósiles, la hidroelectricidad o la energía nuclear. Dentro de las afectaciones más comunes, se pueden mencionar las siguientes:

- La baja densidad energética del viento (reducida producción), que genera cantidades significativas de electricidad, por lo que se requiere el uso de grandes extensiones de superficie.
- Los periodos de máxima demanda durante el día y máxima generación por la noche cuando los vientos están más fuertes no coinciden, y también, por supuesto, no hay siempre viento.
- Los sitios adecuados para la generación eólica, especialmente el mar abierto, están remotos y lejos de la concentración de demanda eléctrica, por lo que debido a la lejanía del punto de producción al de conexión con la red, el promotor se ve obligado a invertir una cantidad elevada en la línea de conexión comprometiendo seriamente la rentabilidad del proyecto.

En términos de eficiencia, los costos versus rendimiento, son susceptibles a de mejora, tanto para aplicaciones aisladas como para sistemas conectados a red. Es deseable que tales cambios se apoyen en el uso de nuevos materiales, en innovaciones en los procesos de transformación y disminuciones en el precio de los componentes.

3.3. FASES DE PROYECTO.

La identificación de efectos positivos o negativos, en cualquier proyecto de inversión puede realizarse, de forma sencilla recurriendo a un método donde se definen los contenidos de dicho diseño de forma secuencial, y más o menos detallada, haciendo especial hincapié en los aspectos que pudieran conllevar alteraciones de los factores ambientales y socioeconómicos existentes hasta el momento.

En el caso que nos ocupa, el proyecto de un parque eólico puede estructurarse en tres fases, a saber cronológicamente: ***ejecución, funcionamiento y clausura.***

FASE DE EJECUCIÓN

En esta fase se han diferenciado cinco etapas:

- A. *Construcción de accesos.*
- B. *Construcción de cimentación y plataformas de montaje.*
- C. *Construcción de edificaciones ajenas.*
- D. *Instalación eléctrica.*
- E. *Montaje de aerogeneradores.*

A. Construcción de accesos.

El primer proceso a considerar, está relacionado por un lado, con el transporte de los aerogeneradores y demás equipos complementarios que hay que llevar a la zona de implantación y por otro, con el impacto ambiental ocasionado por dicho transporte. En este proceso, la construcción precisa del acondicionamiento de accesos con ciertos requerimientos en función del tipo de emplazamiento, el cual por lo regular define las dimensiones de los componentes que hay que trasladar y el de la propia maquinaria encargada de dicho traslado.

Los criterios técnicos exigibles para el trazo de vías son extensos: en el caso de instalaciones en tierra se toman en



Figura 58. 1. Transporte por vía terrestre de una aspa, 2. Acondicionamiento portuario que alberga las piezas de un aerogenerador para su posterior traslado a altamar.

"Traslado de piezas para aerogeneradores". Imágenes tomadas del sitio <http://www.windpowermonthly.com/article/1191655/picture-gallery---worlds-largest-blade-begins-journey-scotland>. (Fecha de actualización 23 de julio del 2014).

cuenta radios de curvatura mínimos, pendientes o ciertos anchos de camino y, cuando se trata de instalaciones en mar se toma en cuenta el acondicionamiento de instalaciones portuarias (*figura 58*).

Algunas de estas vías serán de carácter provisional, limitándose su uso a esta primera fase de ejecución y otras, constituirán las pistas de acceso para el mantenimiento y control operacional que deban realizarse durante la vida útil del parque.

B. Construcción de cimentación y plataformas de montaje.

Al igual que para el transporte de los equipos, en las labores de instalación de los aerogeneradores se requieren infraestructuras auxiliares de ingeniería.

Para cimentaciones en tierra se emplean zapatas las cuales deben ser capaces de soportar las cargas gravitacionales provocadas por la torre, la góndola, el transformador y todos los equipos que integran el aerogenerador. La zapata además debe ser capaz de soportar las sollicitaciones provocadas por la acción del viento y resistir el volteo. Adyacente a la cimentación se construye la plataforma de montaje sobre las que se sustentan las grúas necesarias para el izado de las torres y demás componentes del equipo con gran tamaño (*figura 59*).



Figura 59. De izquierda a derecha, se muestra la construcción de la cimentación con empleo de zapatas, así como la fabricación de la plataforma de montaje para la instalación del aerogenerador.

“Plataforma de montaje”. Imágenes tomadas del sitio. <http://www.peraltawind.com/web/en/technology-wind-farm>. (Fecha de actualización 26 de julio del 2014).

Por otro lado para acoplamientos en mar se hace empleo de cimentaciones fijas para profundidades entre 0 a 50 m por medio de pilotes o cimentaciones flotantes,

para profundidades entre 50 a 200 m haciendo uso de líneas de amarre que van ancladas al fondo marino o bien a través de flotadores distribuidos (*figura 60*).

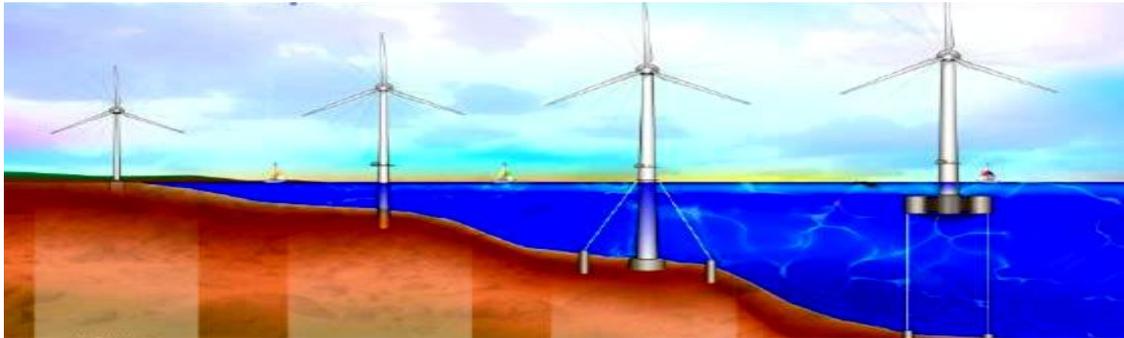


Figura 60. Tipos de cimentación en el mar a través de pilotes, línea de amarre y estructuras flotantes.

“Cimentación en mar”. Imágenes tomadas del sitio. <http://nosoloingenieria.com/viabilidad-eolica-offshore-canarias/>. (Fecha de actualización 28 de julio del 2014).

A diferencia de las construcciones en tierra se emplean buques “Jack up”, para el transporte de las piezas y construcción de la cimentación, estos barcos consisten en una plataforma autopropulsada dotada de varias grúas y 3 o más patas que se anclan al fondo marino para estabilizar la plataforma y poder desarrollar los trabajos necesarios con las grúas (*figura 61*).



Figura 61. 1. Buque “Jack up” transportando piezas de aerogeneradores, 2. Plataforma “Jack up” hincando pilote en altamar.

“Barco Jack up”. Imágenes tomadas del sitio. <https://www.flickr.com/photos/iberdrola/9720740449/?rb=1>. (Fecha de actualización 01 de agosto del 2014).

C. Construcción de edificaciones ajenas.

Por último, las necesidades constructivas se completan con los edificios de de control y subestaciones, estas instalaciones generalmente albergan los lugares de mando para control y mantenimiento, por tanto suelen estar cercanas a los acoplamientos, en el caso de los parques eólicos marinos están construidas en

tierra e instaladas posteriormente en alta mar utilizando la misma concepción de estabilidad empleada en lo aerogeneradores (figuras 62).



Figura 62. 1. Subestación eléctrica onshore. 2. Subestación eléctrica offshore.

“Barco Jack up”. Imágenes tomadas del sitio. <https://www.flickr.com/photos/iberdrola/9720740449/?rb=1>. (Fecha de actualización 12 de agosto del 2014).

D. Instalación eléctrica.

Una vez terminadas las operaciones anteriores, se comenzaran las maniobras de tendido de cables y conexionado.

El sistema eléctrico de un parque eólico tiene por objeto la transferencia de la energía producida por cada aerogenerador hacia la red de la compañía eléctrica para que se suministre a las poblaciones más cercanas. La producción de electricidad en los generadores eólicos se realiza en baja tensión y la evacuación hacia la

red eléctrica de la compañía compradora se realiza en alta tensión. Para lograr esto, es necesario llevar a cabo una doble

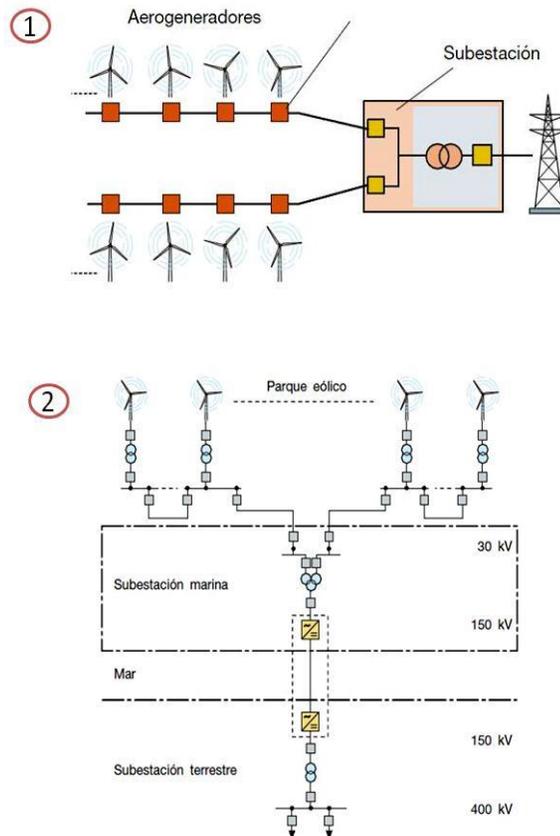


Figura 63. 1. Esquema típico de conexión eléctrica de un parque eólico terrestre, 2. Unión eléctrica de una estación eólica marina.

“Conexiones eléctricas de parques eólicos”. Imágenes tomadas del sitio.

[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/ac764cb1be081128c1257a30003c70d7/\\$file/Cuaderno%20Tecnico_num%2012_Plantas%20eolicas.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/ac764cb1be081128c1257a30003c70d7/$file/Cuaderno%20Tecnico_num%2012_Plantas%20eolicas.pdf). (Fecha de actualización 12 de agosto del 2014).

conversión: de baja a media, en el generador al pie de las maquina y de media a alta tensión, de cada aerogenerador a la subestación. Este último es posible mediante la canalización de cables subterráneos, empleando el uso de zanjas para un menor impacto paisajístico y medio ambiental, además de reducir el riesgo en las operaciones de mantenimiento que podrían encontrar el obstáculo con las conexiones aéreas. Las características y distancia de la red en el punto de entronque condicionarán el diseño y trazado de la instalación eléctrica de cada parque (figura 63).

E. Montaje de aerogeneradores

Una vez transportados los componentes del aerogenerador hasta el punto de anclaje, se procede a su ensamblaje, haciendo uso de una grúa de grandes dimensiones dependiendo el tipo de acoplamiento (onshore u offshore). De este modo se realiza el izado de la torre en tramos, una vez colocados el personal une y ensambla las piezas (figura 64). Ya montada la torre se procede a la instalación de la góndola, la cual se acopla al último tramo de la torre. En



Figura 64. Alzado y armado de torre para aerogenerador. “Izado de torre”. Imágenes tomadas del sitio. http://www.profesorenlinea.cl/ecologiaambiente/Eolico_Parque_Marino.htm. (Fecha de actualización 15 de agosto del 2014).



Figura 65. Montaje de partes de aerogenerador con empleo de grúas, 1. Góndola, 2. Armado de rotor por partes, 3. Elevado de rotor ya armado, 4. Colocación de rotor en góndola “Montaje de partes de turbina eólica”. Imágenes tomadas del sitio. http://www.stltoday.com/suzlon-wind-turbine-assembly-at-edison-mission-group-s-big/image_afbb9309-d17a-5753-a699-19777614fc20.html. (Fecha de actualización 23 de agosto del 2014).



paralelo a esto se procede a la conexión eléctrica de todos los componentes y una vez instalada la góndola, se sube el buje para posteriormente elevar las aspas que forman el rotor o bien armar el rotor con las palas y después elevarlo (*figura 65*).

II. FASE DE EXPLOTACIÓN

En esta faceta es donde se lleva a cabo la puesta en marcha y las labores de conservación para tener un funcionamiento óptimo del parque durante la vida útil de este, los procesos que hacen posible esto son:

- A. *Funcionamiento de aerogeneradores.*
- B. *Funcionamiento de la red eléctrica.*
- C. *Mantenimiento de las instalaciones.*

A. *Funcionamiento de aerogeneradores.*

En este caso se conviene distinguir dos tipos de acciones en el proceso de operación de un aerogenerador, dependiendo del estado en que este se encuentre:

- *Aerogenerador en situación de parada:* La detención en el movimiento del aerogenerador puede estar motivado por cuatro causas; que la velocidad del viento esté fuera del margen de operación, la red eléctrica se encuentre fuera de servicio, se estén haciendo demostraciones u operaciones de mantenimiento que requieran el cese temporal de las máquinas o que se produzcan fallos en las instalaciones.

En este caso los elementos que cobran importancia son aquellos de la estructura exterior, es decir, la torre, el rotor y la cubierta. Así, el emplazamiento, las dimensiones y los materiales que conforman cada turbina serán la causa de los impactos, posteriormente identificados, que se asocian a esta acción.

- *Operación del aerogenerador:* Es el estado productivo del aerogenerador. donde es esencial examinar el funcionamiento de, los elementos estructurales internos (generador, convertidor de energía mecánica en eléctrica, o de la unidad de refrigeración del multiplicador), como aquellos

componentes exteriores cuyo movimiento pudiera provocar algún efecto en el medio, (es el caso del rotor, por el movimiento de sus aspas). Adicionalmente se contempla el uso de las áreas de control y servicios, así como de los accesos asociados al parque.

B. Funcionamiento de la red eléctrica.

La transferencia de energía por el interior del parque eólico, desde las turbinas hasta el punto de enganche con la red pública, compone una serie de impactos relacionados con el propio transporte de electricidad. Ésta será la única acción a examinar en este proceso.

C. Mantenimiento de las instalaciones.

Las labores de manutención de un parque eólico se basan principalmente en el seguimiento periódico del funcionamiento de los aerogeneradores para la detección y solución de los fallos que desencadenan sus paradas. Con respecto a este seguimiento se establecen tareas de mantenimiento preventivo y correctivo (*figura 66*). Como:



Figura 66. Personal dando mantenimiento a diferentes partes de una turbina eólica

“Mantenimiento”. Imágenes tomadas del sitio. <http://www.grupoviloria.com/mantenimiento.php>.
(Fecha de actualización 23 de agosto del 2014).



- Lubricación de los cojinetes, soportes y rodamientos, lo cual implica un cambio de los mismos.
- Reparación de canalizaciones subterráneas.
- Sustitución de piezas de los equipos de operación que se encuentren averiados.
- Almacenamiento de recambios de elementos críticos, y materiales de mantenimiento (como aceites).
- Uso de las áreas de mantenimiento y servicios, puesto que en instalaciones eólicas de cierta envergadura se hace necesaria la presencia continuada de personal de mantenimiento.

III. FASE DE CLAUSURA

La vida media de un parque eólico es de unos 20 a 25 años. Tras este periodo, se debe elegir entre la actualización del mismo o su desmantelamiento completo. En el caso de la segunda opción, los procesos implicados son los siguientes:

- A. Retirada de instalaciones.*
- B. Plan de rehabilitación del medio.*

A. Retirada de instalaciones

Proceso inverso al descrito sobre construcción y montaje. El desarme de los aerogeneradores se realiza por desarticulación de sus componentes mediante equipos específicos. Por tanto, sólo implica uso de maquinaria, voladuras de obra civil y transporte de retirada de las estructuras obsoletas, restos y escombros de obra.

B. Plan de rehabilitación del medio

La restauración de los terrenos afectados por pistas, plataformas, tendidos y otras obras o estructuras del parque se realizará en función de las determinaciones marcadas para cada proyecto. En líneas generales se abordarán labores de restauración vegetal, paisajística (movimiento de tierras, plantaciones, infraestructuras de riego y retirada de restos vegetales) y limpieza de cauces.



“Seamos sabios como el silencio, fuertes como el viento útiles como la luz”

Abdul Baha.

CAPITULO IV

PARTICULARIDADES DEL DESARROLLO EÓLICO EN MÉXICO

CAPITULO IV

PARTICULARIDADES DEL DESARROLLO EÓLICO EN MÉXICO

4.1 PARQUES EÓLICOS ACTUALMENTE EN OPERACIÓN.

En el territorio Mexicano existen sitios con las mejores condiciones de viento, suficientes para instalar plantas que generen al menos 12 mil mega-watios en el año 2020. Hasta el momento (2014) se cuenta con 28 parques eólicos instalados en 6 estados (*figura 67*).



Figura 67. Distribución de Parques Eólicos en la República Mexicana,

“Capacidad instalada de energía eólica en México”. Imágenes tomadas del sitio <http://www.amdee.org/parques-eolicos-mexico>. (Fecha de actualización 28 de agosto del 2014).



Nº	ESTADO	PROYECTO	Nº TURBINAS	FABRICANTE	AÑO DE INICIO DE OPERACIÓN	CAPACIDAD
	Baja California Sur	Guerrero Negro	1	Gamesa	1999	0.6
		La Rumorosa	5	Gamesa	2009	10
Capacidad Total.						10.6 MW
	Nuevo Leon	Santa Catarina	8	GE	2013	22
		Capacidad Total.				
	Tamaulipas	El Porvenir	30	Vestas	2013	54
		Capacidad Total.				
	Jalisco	Los Altos	28	Vestas	2013	50.4
		Capacidad Total.				
	Chiapas	Arriaga	7	Vestas	2012	28.8
		Capacidad Total.				
	Oaxaca	La Venta	7	Vestas	1994	1.57
		La Venta II	98	Gamesa	2006	83.3
		La Ventosa II	120	Gamesa	2008	49.3
		La Ventosa	105	Gamesa	2008	30.6
		Erus, 1st phase	25	Acciona	2009	37.5
		Erus, 2nd phase	142	Acciona	2010	212.5
		Bii Nee Stipa I	31	Gamesa	2010	26.35
		La Mata - La Ventosa	27	Clipper	2010	67.5
		Fuerza Eolica del Itsmo	20	Clipper	2011	50
		Oaxaca II, III Y IV	68-c/u	Acciona	2012	306
		La Venta III	120	Gamesa	2012	102.85
		Oaxaca I		Vestas	2012	102
		Fuerza Eolica del Itsmo	12	Clipper	2012	30
		Bii Nee Stipa II	225	Gamesa	2012	74
		Bii Nee Stipa III	212	Gamesa	2012	70
		Piedra Larga	114	Gamesa	2012	90
		Bii Stinú	124	Gamesa	2012	164
		La Ventosa III	12	Gamesa	2013	20
		Eoliatec del Pacifico	120	Gamesa	2013	160
		Bii Nee Stipa II	225	Gamesa	2013	74
Capacidad Total.						1751.47 MW

De los estados mencionados el principal aportador como es visible es el estado de **Oaxaca**, que cuenta con una de las zonas de mayor potencial para la producción de energía eólica en el país, esta región mejor conocida como el **Istmo de Tehuantepec** esta colocado a la cabeza en la producción de energía renovable a escala nacional e internacional, debido que en esta zona los vientos alisos provenientes del Golfo de México encuentran aquí, el único paso interoceánico (entre el Golfo de México y el Océano Pacífico) en donde confluyen las cordilleras formando una especie de efecto de túnel, la misma estrechez de la parte terrestre, hace que los vientos alcancen una gran fuerza y velocidad (*figura 68*) la mayor parte del año y como resultado de estas excelentes condiciones el desarrollo de proyectos es atractivo en la región. Para esto el gobierno del estado de Oaxaca gestionó ante los Laboratorios Nacionales de Energía Renovable (*National Renewable Energy Laboratories*) de los Estados Unidos de América, un estudio a profundidad sobre el potencial eólico de la región del Istmo, el resultado fue el *Atlas Eólico del Estado de Oaxaca* (*figura 69*) el cual refleja que la región dispone de una capacidad de clase mundial con velocidades de vientos ente 5 a 25 m/s traducido en un potencial que comprende entre 2 hasta 9 Giga Watts, teniendo una referencia aproximada con su máximo aprovechamiento crearía cerca de una quinta parte de lo que genera actualmente Estados Unidos, que es el principal productor mundial de energía eólica y genera 25.174 GW,



Figura 68. Mapa donde se observa la superficie que abarca el Istmo de Tehuantepec así como el efecto túnel que ocasiona la topografía de la zona y la dirección de los vientos que cruzan del Golfo de México hacia el Océano Pacífico.

“Extraordinario Recurso Del Istmo”. Imagen tomada del sitio.

<https://es.scribd.com/doc/64028809/ENERGIA-EOLICA>.

(Fecha de actualización 17 septiembre del 2014).

siguiéndole Alemania con 23.903 GW, España que genera 16.754 y por ultimo China con 5 GW.

A sólo 20 años de haber iniciado la generación de energía eólica, con el parque eólico la Ventosa, la entidad oaxaqueña se ha posicionado como uno de los mayores complejos de energía renovable no sólo en el país, sino en todo el Continente Americano con la operación de 21 centrales eólicas instaladas en el Istmo de Tehuantepec.

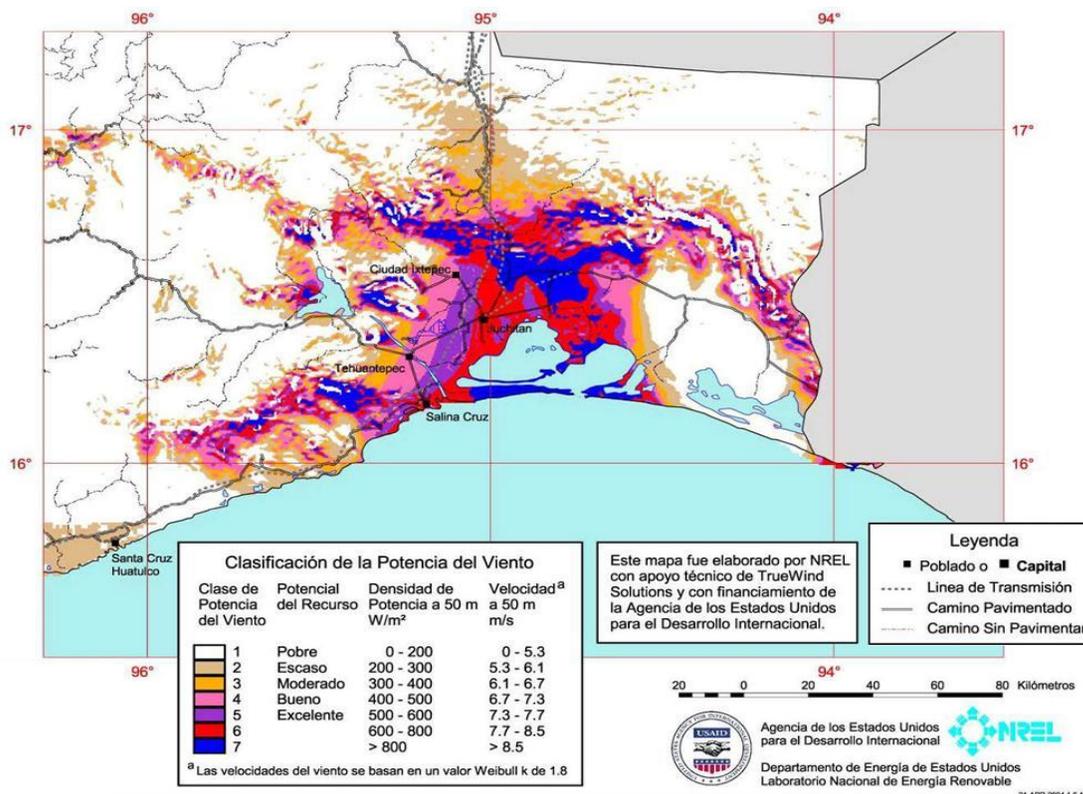


Figura 69. Atlas Eólico del Estado de Oaxaca.

“Mapa de recursos Eólicos en el Istmo de Oaxaca”. Imagen tomada del sitio

<https://es.scribd.com/doc/64028809/ENERGIA-EOLICA>. (Fecha de actualización 18 septiembre del 2014).

Los principales municipios generadores de energía eólica en la región del Istmo son: Santo Domingo Ingenio, Juchitán de Zaragoza, Unión Hidalgo, El Espinal y Asunción Ixtaltepec, los cuales en su conjunto generan 1 mil 750 mega watts, y mantienen 1,186 aerogeneradores (*figuras 70-71*).



Figura 70. Imágenes de los parques eólicos La Venta y La Ventosa, instalados en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca.

“Imágenes hélices del Istmo Oaxaca”. Imágenes tomadas del sitio.

<http://www.panoramio.com/photo/71907232>. (Fecha de actualización 23 septiembre del 2014).



Figura 71. Fotografías tomadas en la Carretera Federal 200, Dolores, OAX, México, en donde se aprecian distintas vistas del Parque Eólico, La Ventosa.

Anónimo. (Fecha de captura 23 septiembre del 2014).

4.2 PRINCIPALES FABRICANTES Y PROVEEDORES.

Las empresas transnacionales proveedoras de equipo y desarrolladoras de proyectos consideran a México como un destino atractivo para invertir en el sector de Energías Renovables. Asimismo, empresas mexicanas han diversificado sus negocios hacia este sector con proyectos en pequeña escala, manufactura y comercialización de equipos.

Algunas de las principales empresas en manufactura de equipo y desarrolladoras de parques eólicos en México son: Acciona, Gamesa Iberdrola, Peñoles, Enel, Demex, Vestas, Siems, Alstom y Eléctrica del Valle De México, de las cuales, enseguida mencionare algunas características.



Acciona Energía es un operador global en energías renovables. En México está presente en toda la cadena de valor de la energía eólica. Sus negocios principales incluyen actividades de desarrollo de proyectos, ingeniería y construcción; fabricación industrial de aerogeneradores; operación y mantenimiento de instalaciones y venta de energía.

Actualmente es propietaria de los parques la Venta III, Eurus, Oaxaca II, Oaxaca III y Oaxaca IV, que se rigen bajo el esquema de Productor Externo de Energía, es decir que su producción es vendida a la CFE y empleada también como Autoabastecimiento, ya que la electricidad que produce es consumida por sus socios.



Gamesa es una empresa española enfocada al diseño, fabricación, distribución e instalación de soluciones energéticas sostenibles. Es uno de los principales fabricantes internacionales de aerogeneradores del mundo y líder en el sector de la fabricación, venta e instalación de turbinas eólicas. En México 7 proyectos eólicos utilizan turbinas eólicas GAMESA y es propietaria de el parque Eoliatec del Istmo bajo el esquema de Autoabastecimiento.



Iberdrola organización española, es una compañía energética global y el líder mundial en energía eólica con operaciones centradas en el Reino Unido, EE.UU. Brasil, España y México. La Ventosa, esta operada por ella bajo la modalidad de Autoabastecimiento.



Servicios Industriales Peñoles es una sociedad minera. Propietaria de el parque eólico Fuerza Eólica del Istmo que es el único de capital mexicano que opera con el esquema de Autoabastecimiento.



Enel Green Power está dedicada al desarrollo y gestión de las actividades de generación de energía de fuentes renovables. Actualmente es poseedor del los parques Bi ne Stipa, bajo el programa de Autoabastecimiento.



Demex Desarrollos Eólicos de México es una empresa española permisionaria de CFE, ha desarrollando el proyecto eólico llamado de "Piedra Larga" en el Istmo de Tehuantepec.



Vestas Wind Systems es una organización danesa que se dedica principalmente al desarrollo, fabricación, venta y mantenimiento de tecnología eólica. Es el primer proveedor mundial de aerogeneradores ya que se ha instalado más de 40.000 aerogeneradores en 65 países de los cinco continentes. La experiencia de Vestas va más allá de los aerogeneradores, ya que también cuentan con especialistas en planificación, instalación, operación y mantenimiento. Sus competencias cubren desde estudios de emplazamiento hasta servicio técnico y mantenimiento.



Siemens, asociación de origen alemán con presencia en México desde hace más de 116 años, cuenta con un

portafolio capaz de satisfacer las necesidades en términos de soluciones para la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. De igual modo, ofrece productos, soluciones inmediatas, integración de sistemas y servicios de campo. Su división de Wind Power incluye aerogeneradores para aplicación en mar y en tierra firme, y cuenta con un alto rendimiento, punto de referencia obligado para la excelencia en la industria de la energía eólica.



Alstom diseña, ensambla, instala y se encarga de la puesta en servicio de una amplia gama de aerogeneradores. Como uno de los fabricantes de aerogeneradores más reconocidos internacionalmente, Alstom ofrece una gama de productos y servicios que incluyen: Desarrollo de parques eólicos: localización del sitio y medición del viento, Suministro de aerogeneradores: diseño de turbinas de viento, aprovisionamiento de componentes y materiales, fabricación y montaje, transporte, montaje y puesta en servicio. Construcción de parques eólicos: obra civil y cableado eléctrico Operación y Mantenimiento: mantenimiento preventivo y correctivo, suministro de partes e instalación de paquetes de actualización.



Eléctrica del Valle de México (EVM) es subsidiaria de Électricité de France (EDF) dedicada a la generación y distribución eléctrica de Francia. EVM-EDF desarrollo el proyecto "La Mata-La Ventosa" bajo el esquema de Autoabastecimiento.

4.3 MICRO EÓLICA APLICADA EN LA CONSTRUCCIÓN.

El aprovechamiento de energía obtenida a través del viento no está exclusivamente condicionado a grandes espacios abiertos, ya que existe el desarrollo de sistemas de pequeña escala que pueden generar desde 400 W a 100 kW, en este tipo de tecnología pequeñas zonas proporcionan el área óptima. Los sistemas están formados por una turbina de eje vertical u horizontal instalada

ya sea en el techo de edificios o casas y últimamente como innovación en energías renovables tratando de implementarse en la construcción de autopistas y puentes.

Edificios.

La producción de electricidad mediante la energía micro eólica puede satisfacer entre un 50 y un 70 por ciento del consumo de una casa, los mini aerogeneradores (1,5 y 100 kw) se instalan en tejados de viviendas naves industriales, granjas o bien se implementan en la arquitectura de edificios, (*figura 72*). La energía producida puede ser almacenada en una batería para ser utilizada en el momento que sea necesario cuando se trate de ubicaciones aisladas o si la instalación está conectada a la red eléctrica general, la energía generada se puede disponer directamente a través de un conector que sincroniza con la red.



Figura 72. Mini eólica implementada en la construcción de edificios así como la instalación en tejados de casas para el aprovechamiento máximo de vientos emitidos en la zona.

“Building Integrated Wind Turbines”. Imágenes tomadas del sitio.

<http://www.wind.psu.edu/buildings/>. (Fecha de actualización 27 septiembre del 2014).

Autopistas.

Con el creciente número de coches a nivel mundial en muchas ciudades de todo el mundo es necesario iluminar las calles y carreteras aumentando de esta manera el consumo de energía eléctrica y la seguridad en las mismas.

Actualmente se ha propuesto una nueva forma de volver a capturar parte de la energía originada por la velocidad de los vehículos en movimiento en las carreteras utilizando la instalación de micro turbinas. La idea básica es que un coche o camión a medida que viaja origina turbulencia del viento y por lo tanto provoca que las turbinas se muevan. La electricidad generada por estos dispositivos girando podría crear energía eléctrica para alimentar las luces de la calle y así alumbrar la ruta de los autos a su destino (*figura 73*).

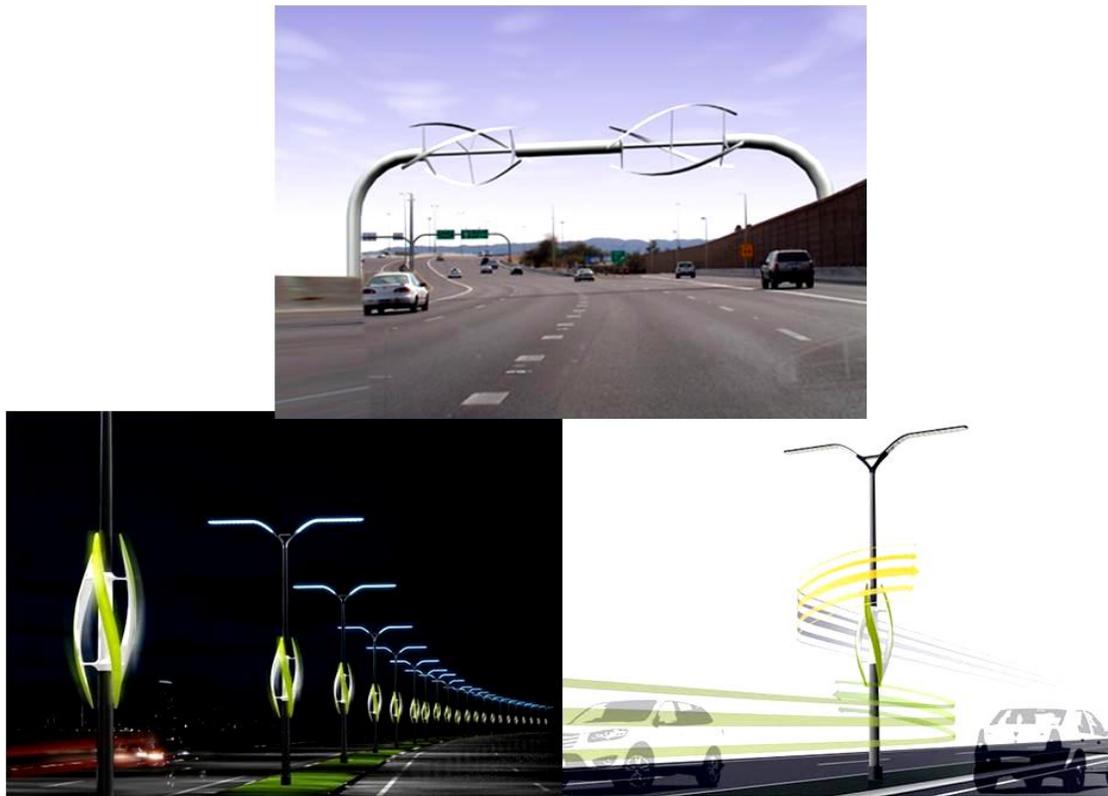


Figura 73. Ideas de innovación Eoloeléctrica en carreteras donde se pretende el uso de turbinas de eje vertical para el aprovechamiento de los vientos generados por el paso de los vehículos

“Motorway Turbine Lighting”. Imágenes tomadas del sitio. <http://www.energyefficiencyadvice.co.uk/motorway-turbine-lighting>. (Fecha de actualización 30 septiembre del 2014).

Puentes.

Los elementos de puentes que poseen grandes alturas generalmente están expuestos y por lo general reciben una dosis de vientos bastante fuertes a los costados. Por estas razones, el diseño de puentes para el aprovechamiento eólico parece tener mucho sentido.

Los proyectos de puentes propuestos integran turbinas de viento en los espacios de los pilares, esta idea es especialmente buena ya que esto podría lograrse desde un punto de vista estructural en ingeniería, para así poder lograr la generación de electricidad a partir de los vientos cruzados, dependiendo el tipo de puente ya sea en tierra o bien en puertos (*figura 74*).



Figura 74. Conceptos de puentes para la integración de turbinas eólicas en la subestructura, para el aprovechamiento de los vientos cruzados a los que son sometidos diariamente dependiendo el tipo de construcción. “Wind Turbine Bridge Transforms”. Imágenes tomadas del sitio. <http://inhabitat.com/solar-wind-turbine-bridge-repurposes-viaduct-for-public-space/>. (Fecha de actualización 28 de agosto del 2014).



C O N C L U S I O N E S

Con el desarrollo de esta tesis, se analizó de manera práctica la aplicación de la energía eólica, sus ventajas, desventajas, su historia, definición en fin sus conceptos más relevantes. De todos estos aspectos se llega a la conclusión de que es una fuente de energía renovable con varias ventajas competitivas con respecto a otras opciones, ya que además de reducir la dependencia de combustibles fósiles que emiten contaminantes, el viento es un recurso energético seguro y económico. También el desarrollo de esta energía puede ser motor en el desarrollo rural y regional, tanto para vender la energía generada como para suministro de la población, debido a que los costos actualmente para parques de gran escala son competitivos con algunas plantas que utilizan combustibles fósiles. Y poco a poco el avance tecnológico de los aerogeneradores hará de esta una opción cada vez más óptima al paso del tiempo, ya que la investigación y desarrollo de nuevos diseños y materiales para aplicaciones en aerogeneradores eólicos, hacen de esta industria una de las más dinámicas.

Cabe mencionar que la ocupación de la energía eólica en diferentes partes del mundo, está siendo utilizada como alternativa energética, ya que esta energía es una de las que menos contaminan, no daña la capa de ozono, no destruye el suelo ni contamina el aire, pero emite otro tipo de contaminación como la acústica, o bien la alteración del paisaje natural que son moderadas en comparación a otras fuentes energéticas. En general, es muy utilizada en algunos países industrializados. Sin embargo en nuestro país el sector de energías renovables, a pesar de ser una industria naciente, ha crecido favorablemente en los últimos años, principalmente en energía eólica. Lo que ha dado como resultado que varias empresas del ámbito, tanto nacional como internacional, desarrollen diversos proyectos en el país, lo que coloca a México como uno de los principales países de América latina de destino de inversión.

Finalmente, otro aspecto interesante es el campo de las pequeñas instalaciones, aquí hace falta un mayor estudio por que el viento puede ser aprovechado no solo en centrales de gran tamaño si no también en micro



sistemas, para poder tener un mejor crecimiento ya no solo a nivel industrial si no a nivel individual para el beneficio de la población Por esta razón, en esta tesis se evidencian algunas ideas de innovación tecnología que pueden ser implementadas en el país.



B I B L I O G R A F I A

Aguilar García, Legaz, “*El viento: Fuente de Energía*”, Editorial Alambra, España 1986.

Arroyo Hernández Patrocinio, “*Energía y Parques Eólicos*”, Curso Intersemestral, UNAM Fes Aragón 2007.

Del Álamo Salgado, José Ramón, Ibáñez Díaz, Miguel Ángel, “*Montaje y mantenimiento eléctrico de parque eólico*”, Editorial Vértice, Inglaterra 2011.

Escudero López, José María, “*Manual de Energía Eólica*”, Editorial Mundi-Presa Libros S.A, España 2004.

Riukin, David, Laurel, Silk, “*Wind Energy*”, Editorial. Jones & Bartlett Learning, United States of America 2013.

Shepherd, William, Zhang, Li, “*Electricity Generation Using Wind Power*”, Editorial World Scientific, United States of America 2010.

Stankovic, Sinisa, Dr Campbell, Neil, Dr Harries, Alan, “*Urban Wind Energy*”, Editorial BDSP Partnership Ltd, United States of America 2009.

Tomas Peraltes, Benito, “*Guía de instalación de Energía Eólica*”, Editorial Creaciones Copyright, S.L, España. 2001.

Villarrubia López, Miguel, “*Energía Eólica*”, Editorial CEAC, España 2004.

Villarrubia López, Miguel, “*Ingeniería de la Energía Eólica*”, Editorial Marcombo, España 2012.

Vaughn, Nelson, “*Wind Energy and the Environment*”, Editorial CRC Press, United States of America 2009.

Wizelius, Tore, “*Developing Wind Power*”, Editorial Earthscan, United States of America 2003.



REFERENCIAS WEB

“Aprovechamiento de la energía eólica, costos, emplazamiento y desarrollo tecnológico”, Recuperado el 28 de abril del 2014.
<http://www.offnews.info/downloads/EnerdossierEolica14072010.pdf>.

“Cuaderno De Aplicaciones Prácticas N^o 12 Plantas Eólicas”, Recuperado el 02 de abril del 2014.
[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/ac764cb1be081128c1257a30003c70d7/\\$file/Cuaderno%20Tecnico_num%2012_Plantas%20eolicas.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/ac764cb1be081128c1257a30003c70d7/$file/Cuaderno%20Tecnico_num%2012_Plantas%20eolicas.pdf).

“Energía y sus transformaciones”, Recuperado el 02 de febrero del 2014.
<http://www.slideshare.net/JorgeTauro/energa-y-sus-transformaciones-3724352>.

Libro blanco “Proyecto Eólico Oaxaca”, Recuperado el 15 de Septiembre del 2014.
http://159.16.244.43:90/LB%20Proyecto%20E%C3%B3lico/PROYECTO_EOLICO_Parte1.pdf.

Página electrónica “Asociación Mexicana de Energía Eólica AMDEE”
<http://www.amdee.org/>.

Página electrónica “Comisión Federal de Electricidad CFE”,
<http://www.cfe.gob.mx/paginas/home.aspx>.

Página electrónica “Global Wind Energy Council, GWEC”
<http://www.gwec.net/>.

Página electrónica “Wind Power México”,
<http://www.mexicowindpower.com.mx/2014/informacion2-wp14.html>

“Proyectos eólicos”, Recuperado el 10 de febrero del 2014.
<http://www.giz.de/de/downloads/sp-EIA-proyectos-eolicos.pdf>.