



*UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MÉXICO*

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

*EVALUACION DEL RECURSO EÓLICO EN LA
REGION DE LA RUMOROSA, BAJA
CALIFORNIA MÉXICO*

*TESIS PROFESIONAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA*

PRESENTA:

DORANTES ENRIQUEZ JOSE ANGEL

DIRECTOR DE TESIS:

M. EN I. DAVID FRANCO MARTÍNEZ

SAN JUAN DE ARAGÓN, ESTADO DE MÉXICO

México 2011





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicatorias:

A Dios:

Por darme la oportunidad de vivir esta gran experiencia, por llenar mi vida con grandes momentos al lado de los que amo, por estar presente siempre.

A mi Madre:

*Por ser el Amor más grande en mi vida, por ser mi ejemplo y mi inspiración, porque me has enseñado a enfrentar la vida con tu ejemplo de fortaleza, porque tu amor nunca ha tenido límites conmigo, porque eres capaz soportar el peso del mundo sobre tus hombros y aun así regalarme una sonrisa y brindarme tu calor, porque ni con el poema más hermoso podría describir lo que significas para mí, eres mi alegría de cada día **TE AMO MAMA.***

A mi Padre:

*Por ser mi mas Grande orgullo, por ser mi mayor ejemplo de Honestidad y Trabajo, porque a pesar que los años pasen para mí seguirás siendo el hombre más fuerte y el más sabio del mundo porque aunque no te lo digo todos los días eres mi héroe, porque tu vida es mi ejemplo más grande de superación, **TE AMO PAPA.***

A mis Hermanos:

Antonio, Victoria, Baldemar, Evelia, Analilia, Rubicela, Zuemy Por ser mis primeros maestros en la vida, Por ser mi orgullo y fuente de inspiración, porque en todo momento me han apoyado y nunca me han dejado de regalarme sus enseñanzas, por amarme con todos mis defectos, porque en mis recuerdos de vida en familia buenos o malos siempre hemos estado juntos y así me gustaría que pudiésemos seguir toda la vida, los amo muchísimo.

A mis Sobrinos:

Leonardo, Yetlanezi, Nayeli, Fernanda, Eduardo, Angeles, Zianya, Roberto, Baldemar, Isabella, Angelito y Joaquín Porque son una bendición en la familia y un motivo de alegría y orgullo para sus padres, porque a ustedes les pertenece el futuro, por la bendición de verlos sonreír cada día, los amo mis niños.

A mis Cuñados:

Alejandro, Guille, Humberto, Alma, Erick porque son una extensión de mi familia por enriquecer mi vida con sus conocimientos, porque hemos compartido juntos las alegrías y tristezas, por todo su apoyo y todo su cariño gracias.

A Don Rodolfo y Doña Tina:

Por abrirme las puertas de su hogar y de su corazón, por apoyarme en mis momentos de soledad y de tristeza cuando me encontré lejos de mi hogar, por brindarme su cariño y una familia con quien compartir momentos inolvidables, por sus consejos y su ejemplo de vida, los quiero mucho.

A Roció:

Por estar presente en mi vida, por todas las alegrías y tristezas que hemos compartido juntos, por ser incondicional conmigo, por enseñarme que todos los sueños deben tener una fecha para materializarlos, por brindarme tu cariño y amistad en todo momento. Por fin terminamos la bufanda, te quiero mucho.

A mi Asesor M. en I. David Franco Martínez:

Por todo su apoyo durante la elaboración de este trabajo, por brindarme su amistad y su confianza, por sus consejos y su paciencia conmigo, por ser un gran profesor y un gran amigo gracias.

A mis sínodos:

Ing. Edgar Alfredo Cárdenas Pérez.

Ing. Alfredo Montaña Serrano.

Ing. José Raymundo Reyna Orozco.

Ing. Juan Antonio Villanueva Ortega.

Por su apoyo y sus valiosas aportaciones en la realización de esta tesis. Muchas gracias.

Al ingeniero Ángel Alejandro López Torres:

Por su apoyo en la realización de este trabajo, por brindarme su tiempo y sus conocimientos, por toda su paciencia y por brindarme su amistad muchas gracias.

A la UNAM (Fes Aragón)

Por permitirme formar parte de esta gran universidad y de tener el gran orgullo de ser azul y oro, por abrirme sus puertas al conocimiento, porque en sus aulas no solo encontré grandes profesores sino también grandes amigos y grandes experiencias que han enriquecido mi vida y que nunca olvidare.

Evaluación del Recurso Eólico en la región de la Rumorosa, Baja California México

Introducción	i
Capitulo 1: Antecedentes.	2
1.1 La importancia de la energía eléctrica.	2
1.2 Principales plantas de generación de energía en México.	2
1.3 Dependencia de los combustibles fósiles para la generación De electricidad.	3
1.4 Combustibles fósiles (Carbón, Petróleo, Gas Natural).	4
1.4.1. Origen, Características, Aplicaciones y Efectos.	4
1.5 Cambio climático. Penetración de las energías renovables en México.	6
1.5.1. Transición energética global.	9
1.5.2. Obstáculos actuales.	10
1.5.3. Posible evolución futura.	12
Capitulo 2: Recurso Eólico.	16
2.1 Como se origina el viento.	16
2.1.1 Circulación general de la atmósfera.	16
2.1.2 Fuerza de coriolis.	17
2.1.3 Sistemas de vientos.	18
2.2 Antecedentes de la utilización del viento.	20
2.3 Determinación del potencial energético del viento.	21
2.4 Distribuciones teóricas de densidad de probabilidad de velocidad del Viento.	22
2.4.1 FDP de Weibull.	23
2.4.2 FDP Normal.	23
2.4.3 FDP de Rayleigh.	24
2.5 Energía Eólica en el mundo.	24
2.6 Recurso eólico en México.	26

2.7 Evaluación del recurso eólico .	28
2.7.1 Toma de datos de velocidades y dirección del viento.	28
2.7.2. Que es una estación meteorológica automática.	31
2.7.3 Perfil vertical de la velocidad del viento.	32
2.7.4. Perfil logarítmico.	32
2.7.5. Perfil de ley de potencia.	33
2.7.6. Variación de la densidad del aire respecto a la altura.	34
2.7.7. Limite de Betz.	35
Capitulo 3: Tecnología Eólica.	38
3.1 Clasificación de los aerogeneradores por su aplicación .	38
3.1.1 Aerogeneradores para aplicaciones aisladas.	38
3.1.2 Aerogeneradores para centrales eoloeléctricas.	38
3.2 Configuración general de los aerogeneradores.	39
3.2.1 Principio de operación sistema conversor de energía .	41
3.2.2 Elementos que integran un sistema conversor de energía eólica.	42
3.3 Aplicaciones de la energía del viento.	45
3.3.1 Bombeo de agua.	45
3.3.1.1 Aerobombas mecánicas .	46
3.3.1.2 Aerobombas eléctricas.	46
3.3.2 Generación eléctrica .	47
3.3.2.1 Sistemas autónomos.	47
3.3.2.2 Sistemas interconectados.	48
3.3.2.3 Sistemas híbridos .	48
3.4 Instalación.	49
3.5 Localización.	52

Capitulo 4: Metodología de Evaluación del recurso Eólico (caso de la Rumorosa, Baja California, México).	54
4.1 Obtención de datos.	54
4.2. Determinación de la velocidad y dirección del viento en la Estación BC07.	55
4.3 Extrapolación a 50 metros de altura .	59
4.4 Duración del viento.	60
4.5 Curva de generación de potencia mecánica.	62
4.6 Conclusiones.	66
Anexo A: Graficas de Evaluacion Bimestrales .	67
Anexo B: Memoria de cálculo.	73
Bibliografía.	75

INTRODUCCIÓN

En la actualidad para nuestra generación es imposible poder imaginar un mundo sin electricidad ya que se ha vuelto una necesidad básica en el ser humano, sin embargo la generación de la misma en su mayoría requiere del uso de los combustibles fósiles, si bien es cierto que el mundo ha tenido grandes avances tecnológicos también es cierto que ese avance ha traído como consecuencia un daño apreciable a nuestro medio ambiente, es por ello que también a nuestra generación corresponde crear una conciencia ecológica y cooperar en la búsqueda de alternativas de solución.

La existencia de viento pone a nuestro alcance una energía totalmente renovable, la energía eólica, aunque siempre estaremos a merced de su variabilidad, lo que nos obligará en muchos casos a disponer de otras fuentes alternativas para poder mantener un régimen continuo de consumo.

El viento es un movimiento del aire desde áreas de presión más altas, hacia áreas de baja presión. Estas diferencias de presión son causadas por diferencias de temperaturas.

La energía eólica es de las más antiguas empleadas por el hombre. En sus inicios el viento solamente era utilizado para ser transformado en energía mecánica, tales como extracción de agua o en molinos de harina. Hoy día su aplicación más extendida es la generación de electricidad, ya que ésta puede ser fácilmente distribuida y empleada en la mayoría de fines

Con el presente trabajo se llevo a cabo la Evaluación del Recurso Eólico en la región de la Rumorosa, Baja California México mediante la obtencion de datos estadísticos de una estación meteorológica automatizada perteneciente al servicio meteorológico nacional esto con la finalidad de conocer la factibilidad de aprovechar el recurso que existe en esta región pero sobre todo para que éste pueda servir de apoyo en la evaluación de cualquier otra región del país de una forma sencilla y económica.

Para su fácil comprensión se dividió en cuatro partes: En la primera parte se aborda los antecedentes de la energía eléctrica, como se produce, cuales son las principales fuentes de generación, que son los combustibles fósiles y el impacto del cambio climático por la utilización de los mismos. En la segunda parte se habla del recurso eólico, como se origina el viento, los antecedentes de su utilización, características generales y la evaluación de recurso eólico. En la tercera parte se aborda la tecnología eólica, sus diferentes aplicaciones y composición de los aerogeneradores. En la cuarta parte se explica cómo se llevo a cabo la evaluación de la región y los resultados obtenidos de la misma.

CAPÍTULO 1

1. Antecedentes.

1.1 La importancia de la energía eléctrica.

1.2 Principales plantas de generación de energía en México.

1.3 Dependencia de los combustibles fósiles para la generación de electricidad.

1.4 Combustibles fósiles (Carbón, Petróleo, Gas Natural).

1.4.1. Origen, Características, Aplicaciones y Efectos.

1.5 Cambio climático. Penetración de las energías renovables en México.

1.5.1. Transición energética global.

1.5.2. Obstáculos actuales.

1.5.3. Posible evolución futura.

1. ANTECEDENTES

La energía eléctrica tiene una gran importancia en el desarrollo de la sociedad, su uso hace posible la automatización de la producción que aumenta la productividad y mejora las condiciones de vida del hombre.

El ahorro de electricidad, generaría ahorro del petróleo y divisas que se pueden invertir en otras ramas de la economía, la educación, la investigación o la cultura. En nuestro país no solo debemos preocuparnos por la situación que tiene el petróleo en el planeta, somos un país subdesarrollado y aunque tenemos yacimientos de este recurso, los niveles de extracción aún no satisfacen el consumo nacional, por ello nos vemos en la necesidad de invertir gran cantidad de divisa para comprarlo.

Por ello se deben tomar las medidas pertinentes para su ahorro, ya que las termoeléctricas constituyen nuestra principal fuente de energía eléctrica, al aumentar la demanda eléctrica hay que aumentar la capacidad de generación de las centrales eléctricas.

1.1 La importancia de la energía eléctrica.

La energía eléctrica sin duda es el energético más utilizado en el mundo. La electricidad es el pilar del desarrollo industrial de todos los países, parte importante del desarrollo social, elemento esencial para el desarrollo tecnológico y juega un papel muy importante en la vida del ser humano, con la electricidad se establece una serie de comodidades que con el transcurso de los años se van haciendo indispensables para el hombre.

Las compañías de generación de energía eléctrica en América Latina han pasado desde la década de 1990 por graves crisis operativas y de crecimiento, lo que ha provocado en algunos casos la creación y el establecimiento de políticas de privatización, mismas que no han generado, ni para ellas ni para sus países, una solución viable a su problemática contemporánea y futura.

El desarrollo de la humanidad y la preocupación por mejorar la calidad de vida ha llevado a una continua innovación tecnológica que ha tenido entre sus consecuencias la utilización intensiva de combustibles fósiles. Alrededor de 80% de la energía que se consume en el mundo proviene de este tipo de combustibles que producen emisiones de gases efecto invernadero (GEI), los cuales traen como resultado cambios en el clima.

1.2 Principales Plantas de Energía en México

La Comisión Federal de Electricidad es la empresa del Estado que se encarga de la generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica en el país. Actualmente atiende a 33.9 millones de personas. Sin embargo, poco se sabe de dónde proviene la energía que todos los días de forma permanente mantiene las actividades de personas, empresas y gobierno. La capacidad de generación cuenta con 177 centrales generadoras de energía, lo que equivale a

51,081 MW (Mega watts), incluyendo a aquellos productores independientes que por ley están autorizados para generarla. Los clientes a los que se suministra energía eléctrica están divididos por su actividad, así el 0.62% se destina al sector servicios, el 10.17% al comercial, el 0.78% a la actividad industrial, el 0.44% al Agrícola y el uso más importante es el doméstico, con 87.99% de los usuarios. Además, la demanda aumenta en 1.1 millones de solicitantes cada año.

La capacidad instalada se integra con todas las formas de generación; las termoeléctricas representan el 44.80% de la generación (figura 1.2), en tanto las hidroeléctricas el 22.17%, seguidas de las carboeléctricas que generan el 5.22% del total de la electricidad en el país, mientras que las nucleoeeléctricas contribuyen con el 2.74%, con menor capacidad están las Geotermoeléctricas con 1.92% de generación total y las Eoloeléctricas con sólo 0.171%. Un caso especial son los productores independientes que producen un alto porcentaje en relación con las otras formas de generación, ya que aportan el 22.98% de la capacidad instalada, según la misma CFE.



Fuente: Hill Powers, P.E (2002).

Figura 1.2 Principales centrales termoeléctricas en México.

Fuente: <http://www.Hill Powers.com>

1.3 Dependencia de los combustibles fósiles para la generación de electricidad.

¿Por que usamos extensamente los combustibles fósiles todavía?

La pregunta es simple: porque es mas barato que otras alternativas que existen en la actualidad. Algunos científicos medioambientalistas vaticinan que los precios de los combustibles fósiles aumentaran en el tiempo debido a su escasez en el mercado. Esto puede provocar un cambio a fuentes de tecnología alternativa que, de hecho, ya se esta empezando a notar. El IPCC (Panel intergubernamental

sobre el cambio climático) no esta seguro si desaparecerán totalmente los combustibles fósiles en un futuro.

Los humanos necesitamos energía para cualquier función que desarrollamos. Las casas se deben calentar, se necesita energía para el desarrollo de la industria y la agricultura e incluso en nuestro cuerpo existe un flujo constante de energía. Todos los procesos que nos proporcionan los lujos y comodidades en nuestra vida diaria requieren de un gasto energético. Esto es un proceso industrial que puede desarrollarse mediante el uso de diferentes fuentes. Estas fuentes pueden ser renovables y no renovables. Las fuentes de energía renovable se reemplazan con el tiempo y por lo tanto no desaparecen fácilmente. Sin embargo las fuentes de energía no renovable están amenazadas y pueden desaparecer si el uso es alto.

Hoy en día, se usan muchas fuentes de energía renovables, por ejemplo energía solar, eólica e hidráulica. Irónicamente, hoy en día todavía utilizamos como mayores recursos energéticos aquellos provenientes de fuentes de energía no renovable, o combustibles fósiles. Al no ser renovable estas fuentes tendrán una tendencia a subir de precio hasta niveles en los que no será económicamente satisfactorio su utilización.

1.4 Combustibles fósiles

1.4.1 Características, origen, aplicaciones y efectos de los combustibles fósiles

Históricamente, los combustibles fósiles están disponibles en grandes cantidades fácil de obtener y transportar. Sin embargo existen claros signos en la actualidad que el las fuentes de suministro de combustible fósiles son limitadas y se agotan y que su reposición podría tardar del orden de siglos. Tanto las fuentes como los sumideros de combustibles fósiles son limitados. Los combustibles fósiles consisten en depósitos de organismos fósiles que en una ocasión estuvieron vivos. La materia orgánica se forma durante siglos, consisten principalmente en uniones de carbón e hidrogeno. Existen tres tipos de combustibles fósiles que pueden usarse para la provisión energética: carbón, petróleo y gas natural.

La energía que proviene de la quema de combustibles fósiles (figura1.4) se convierte en electricidad y calor en plantas eléctricas. Cuando se queman los fósiles el carbón e hidrogeno reaccionan con el oxigeno produciendo dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O). Durante esta reacción se produce calor. La electricidad se genera mediante la transformación de energía mecánica (calor) con energía eléctrica por medio de una turbina o generador. Las plantas eléctricas son muy caras de construir y por lo tanto la inversión inicial es muy grande. En la mayoría de las ocasiones se crema mayor electricidad que la que se necesita, porque la electricidad no se puede almacenar. La demandas eléctricas varían durante el año y por lo tanto la provisión debe de estimar cual será la carga máxima prevista, que significa la mayor demanda energética durante el año. Si las demandas exceden significativamente la capacidad de la planta eléctrica de generar energía puede provocar apagones temporales.

Carbón

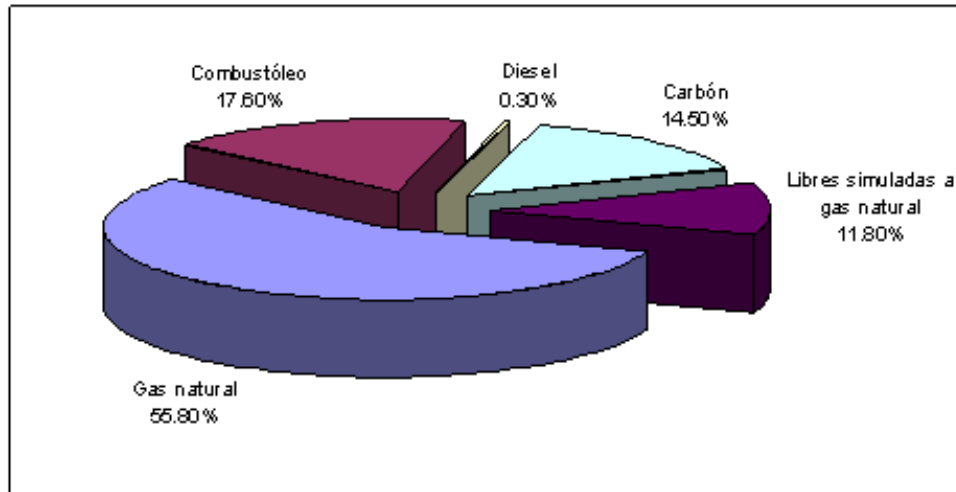
Es un combustible fósil que se ha formado durante millones de años por el depósito y caída a la tierra de material vegetal. Cuando estas capas se compactan y se calientan con el tiempo, los depósitos se transforman en carbón. El carbón es muy abundante en comparación con otros combustibles fósiles. Los analistas predicen en ocasiones que a nivel mundial el uso del carbón aumentara cuando haya escasez de petróleo. Los suministros actuales de carbón pueden durar del orden de 200 años o más. El carbón generalmente se extrae de las minas. Desde mediados del Siglo 20, el uso del carbón se ha doblado. Desde 1996 su aplicación empieza a disminuir. Muchos países dependen del carbón como fuente energética porque no pueden permitirse la utilización de petróleo o gas natural al ser más costoso. La china e India son los mayores usuarios de carbón como fuente energética.

El petróleo

Es un líquido combustible fósil que se forma por los restos de microorganismos marinos depositados en el fondo del mar. Después de millones de años los depósitos acaban en rocas y sedimentos donde el petróleo es atrapado en ciertos espacios. Se extrae mediante plataformas de explotación y es el combustible más usado. El petróleo crudo consiste en muchos compuestos orgánicos diferentes que se transforman en productos en un proceso de refinamiento. Se desarrolla en los coches, aviones, carreteras, tejados y muchos otros usos, no puede encontrarse de manera constante en cualquier parte de la tierra y consecuentemente es un recurso limitado a ciertas áreas geográficas.

El gas natural

Es un recurso fósil gaseado que es muy versátil, abundante y relativamente limpio si se compara con el carbón o petróleo. Al igual que el petróleo su origen procede de los microorganismos marinos depositados. Es una fuente de energía relativamente poco explotada y nueva. En 1999, se utilizaba más carbón que gas natural. Sin embargo en la actualidad el gas natural empieza a ganar terreno en países desarrollados. De cualquier manera, la gente teme que al igual que el petróleo también el gas natural desaparecerá. Algunos científicos han previsto que esto ocurrirá a mediados o finales del siglo 21. El gas natural consiste fundamentalmente en metano (CH_4). Se comprime en volúmenes pequeños en grandes profundidades en la tierra. Al igual que el petróleo, se extrae mediante perforación. Las reservas de gas natural están más distribuidas a nivel mundial que el petróleo.



Fuente: Comisión Federal de Electricidad (en SENER, 2005).

Figura 1.3 Consumo de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica: pronóstico para 2014.

Fuente: Comisión Federal de Electricidad

Los combustibles que se queman son responsables de grandes problemas medioambientales que son de gran relevancia en la agenda política actualmente. Ejemplos de la acumulación de gases invernadero, acidificación, contaminación del aire, contaminación del agua, daño de las capas superficiales y ozono troposférico. Estas son señales de problemas medioambientales causados por la liberación de contaminantes que normalmente están de forma natural presente en la estructura de los combustibles, como el Sulfuro y el Nitrógeno. Actualmente, la quema del petróleo es responsable de 30% de las emisiones de dióxido de carbono en aire. El gas natural no libera dióxido de carbono debido a su estructura de metano. Las emisiones mas largas son causadas por la combustión del carbón. El carbón puede dar como resultado fuegos en las capas subterráneas de la tierra que son virtualmente imposibles de extinguir. El polvo de carbón puede incluso explotar. El petróleo puede acabar en el suelo o en el agua en forma cruda, por ejemplo en periodo de guerras o debido a fugas de petróleo. Esto ha causado grandes desastres naturales en el planeta.

1.5 Cambio climatico

Por "cambio climático" se entiende un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.

De acuerdo a los científicos que han analizado este fenómeno, cada vez tendremos climas más extremos y fenómenos climáticos más intensos. En general, los veranos serán más cálidos y los patrones de las lluvias se

modificarán, dando lugar a lluvias más intensas en algunas partes y lluvias menos frecuentes en otras, aumentando así las sequías.

Los estudiosos del fenómeno han concluido que el cambio climático es producto, principalmente, de la actividad humana. El uso intensivo de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gasolinas, diesel, gas natural y los combustibles derivados del petróleo) y la quema y pérdida de bosques son dos de las principales fuentes de este problema.

¿Cómo se produce el cambio climático?

El cambio climático ocurre por una exacerbada acción del efecto invernadero, resultado del incremento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero, es decir, de la cantidad y variedad de algunos de los gases que la componen.

La atmósfera es una mezcla de varios gases y aerosoles (partículas sólidas y líquidas en suspensión). Su composición es sorprendentemente homogénea, resultado de procesos de mezcla que en ella ocurren. El 50% de la masa de la atmósfera está concentrado por debajo de los 5 kilómetros sobre el nivel del mar y donde predominan dos gases: el Nitrógeno (N₂, 78%) y el Oxígeno (O₂, 21%).

De manera natural, la atmósfera está compuesta en un 78.1% de nitrógeno, un 20.9% de oxígeno, y el restante 1% por otros gases, entre los que se encuentran el argón, el helio, y algunos gases de efecto invernadero, como el bióxido de carbono (0.035%), el metano (0.00015%), el óxido nitroso (0.0000016%) y el vapor de agua (0.7%).

Derivado de la actividad humana, una gran cantidad de gases han sido emitidos a la atmósfera, lo que ha cambiado ligeramente la composición de la misma. Como ejemplo se puede mencionar que la concentración de varios de los gases de efecto invernadero ha aumentado.

En los últimos trescientos años la cantidad de bióxido de carbono aumentó de 280 a 368 miligramos por metro cúbico (mg/m³ o partes por millón); la de metano, de 0.7 a 1.75 mg/m³; y la de óxido nitroso, de 0.27 a 0.316 mg/m³. Esto significa que, en volumen, ahora el bióxido de carbono es el 0.046% de la atmósfera en lugar del 0.035%; el metano ahora es el 0.00037% en lugar del 0.00015%, y el óxido nitroso es el 0.00000187% en vez del 0.0000016%.

Aunque estas concentraciones son muy pequeñas comparadas con las del oxígeno o el nitrógeno, el cambio en ellas realmente está afectado al planeta. Para comprender mejor el cambio climático, es entonces necesario saber lo que son el efecto invernadero y los gases de efecto invernadero.

Efecto invernadero

El sol radia energía solar a la tierra. La mayor parte de esta energía (45%) se radia de nuevo al espacio. Los gases de efecto invernadero en la atmósfera (tabla 1.5)

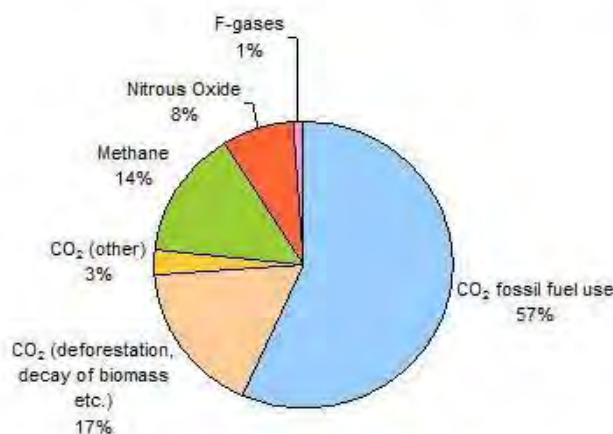
contribuyen al calentamiento global por absorción y reflexión de la energía solar y atmosférica. Este fenómeno natural es lo que denominamos efecto invernadero. Estamos de acuerdo con la correlación existente entre los cambios de temperatura global. Si los gases de efecto invernadero no existieran la tierra tendría temperaturas por debajo de los -18°C .

Gases invernaderos naturales	Emisiones antropogénicas
H ₂ O (vapor de agua)	CO ₂ (dióxido de carbono)
CH ₄ (metano)	CH ₄ (metano)
CO ₂ (dióxido de carbono)	N ₂ O (óxido nitroso)
O ₃ (ozono)	
N ₂ O (óxido nitroso)	

Tabla 1.5: gases invernadero naturales y antropogénicos
Fuente: IPCC Assessment report 4 (2007)

Después de la revolución industrial de 1700 el efecto invernadero se afianzo así como las emisiones de gases invernadero de naturaleza antropogénica (tabla 1). La fuente principal de emisiones de gases invernadero antropogénico es combustibles fósiles (figura 1.5).

Global Anthropogenic GHG Emissions by Gas (2004)



Source: IPCC Assessment Report 4 (2007), Summary of Policymakers: Figure SPM 3

Figura 1.5: Emisiones de gases de efecto invernadero antropogénicas globales
Fuente: IPCC Assessment report 4 (2007)

Penetración de las energías renovables en México

El acelerado avance reciente de la tecnología asociada al aprovechamiento de las energías renovables, su consiguiente abaratamiento y la necesidad de cuidar el ambiente han ubicado a las energías renovables como alternativas a ser consideradas en los planes energéticos y ambientales, presentes y futuros, de cualquier país en el mundo.

Ya sea para proveer a regiones marginadas el acceso a servicios de energía, para surtir la energía necesaria para servicios municipales, y/o para ser parte integral de los sistemas que los proveen en centros urbanos, las energías renovables deben ser integradas a los portafolios de quienes toman las decisiones a nivel nacional, regional, empresarial y hasta doméstico.

Para que esto ocurra en nuestro país es necesario impulsar el desarrollo tecnológico nacional, adecuar y adoptar los avances tecnológicos internacionales en la materia, y promover la incorporación de éstos en el desarrollo futuro de los sistemas energéticos nacionales. Esto implica, entre otras cosas, establecer especificaciones técnicas que aseguren la calidad y rendimiento de dichos sistemas, contar con personal capacitado para el diseño, instalación y mantenimiento de los mismos, y promover empresas con capacidad de servicio en todo el territorio nacional. De esta manera la tecnología local avanzará y podrá competir internacionalmente.

La sociedad y el gobierno mexicanos tienen gran interés en el aprovechamiento de las energías renovables. Esto genera un ambiente favorable para analizar y establecer las bases institucionales y estructurales para su promoción como formas de energía que contribuyan a satisfacer la creciente demanda de energéticos y ayude al establecimiento futuro de esquemas basados en la energía sustentable.

1.5.1 Transición energética global

Durante el desarrollo reciente de las civilizaciones y las sociedades e industrias humanas, la experiencia muestra que al mundo le ha tomado alrededor de 60 años transitar desde una dependencia primaria de un recurso energético, a uno nuevo, o a un nuevo conjunto de recursos energéticos. Tomó unos 60 años transitar, desde nuestro estado de dependencia de la madera como leña, hacia el carbón. Entonces ya se iniciaba el siglo XX, y tomó quizás otros 60 años (desde 1910 a 1970) el tránsito completo de la dependencia del carbón a una dependencia marcada sobre el petróleo y el gas natural, aunque el carbón ha continuado siendo importante para la generación de electricidad.

Gran parte de la humanidad parece haber adoptado los combustibles fósiles como si fuesen a estar disponibles para siempre, o como si cualquier otra transición energética fuese una tarea de las futuras generaciones, pero no de la presente. Actualmente parecen estar surgiendo las limitaciones ambientales derivadas del uso ilimitado de los combustibles fósiles, con implicaciones negativas y

potencialmente gigantescas para todas las naciones. Por cierto, estos límites están siendo tomados seriamente en cuenta en la formulación de las políticas gubernamentales en la mayoría de los países desarrollados.

1.5.2 Obstáculos actuales

Existen diversos factores que se pueden considerar dentro de éstos a continuación citaremos algunos de ellos.

Políticos:

- ❖ Los promotores de las energías renovables tienen poco peso político.

Legales:

- ❖ Existe un monopolio del estado en la generación de energía eléctrica.
- ❖ Existe un vacío legal en torno al aprovechamiento de las energías renovables (no hay leyes que induzcan su aprovechamiento).
- ❖ No existen regulaciones regionales sobre el uso de suelos y el acceso a recursos energéticos.
- ❖ La ley reglamentaria de electricidad indica que Comisión Federal de Electricidad debe generar al menor costo, lo que se interpreta que en todas sus compras debe preferir la opción más barata (por kWh); por tanto, Comisión Federal de Electricidad no compra kWh renovables.

Administrativos/institucionales:

- ❖ Existe una burocracia excesiva para establecer empresas.
- ❖ Existen dificultades para la participación privada en la generación de energía eléctrica.
- ❖ En el caso de auto consumidores cuya energía eléctrica generada tiene que inyectarse y transportarse por la red, aparentemente CFE es muy conservadora en los criterios para calcular el costo de posteo en relación con la capacidad que les reconoce, y les exige además una capacidad de respaldo muy alta.
- ❖ Las instituciones del sector energético son rígidas frente al desarrollo de nuevas fuentes porque están dominadas por quienes se benefician con el "status quo".
- ❖ El marco institucional para la promoción y aplicación de las energías renovables es muy limitado.
- ❖ La política energética y las perspectivas correspondientes están basadas en combustibles fósiles.
- ❖ Existe falta de sinergia entre los planes de electrificación rural y el desarrollo de fuentes renovables.
- ❖ En el marco de toma de decisiones actual (que incluye subsidios, subsidios cruzados, hábitos de consumo, costumbres sindicales, etc.) las energías renovables no son competitivas.

Económicos/Financieros:

- ❖ Los precios de los energéticos no reconocen actualmente los costos ambientales (lo que juega en contra de las energías renovables).
- ❖ Algunas fuentes energéticas tradicionales tienen subsidios.
- ❖ Los energéticos primarios convencionales tienen precios relativamente bajos.
- ❖ Los precios de los energéticos primarios convencionales son volátiles.
- ❖ Los costos unitarios del aprovechamiento de las energías renovables todavía no son menores que los de las convencionales.
- ❖ Se desconocen los precios de los recursos, lo que incrementa los costos de transacción.
- ❖ Prevalcen los intereses de los sistemas centralizados (como sistemas económicos-técnicos).
- ❖ No se valoran en México las externalidades ambientales y de salud de las distintas fuentes energéticas.
- ❖ Las energías renovables requieren en general inversiones iniciales mayores (aunque sus costos de operación son menores).
- ❖ No existen mecanismos comerciales para el financiamiento de proyectos de energías renovables.
- ❖ Las energías renovables tienen actualmente altos costos.

Técnicos:

- ❖ Existe poca información detallada y confiable sobre los recursos energéticos renovables del país.
- ❖ Los “stocks” tecnológicos del país en energías renovables son prácticamente nulos.
- ❖ La característica de intermitencia de las energías solar y eólica.

Recursos humanos:

- ❖ Los recursos humanos capacitados para labores de desarrollo de proyectos, ingeniería y operación de centrales generadoras son escasos.

Sociales/Culturales:

- ❖ Existe una percepción social de que el petróleo es “inagotable”.
- ❖ Existe la percepción social de que hay otras alternativas mejores a las energías renovables; por ejemplo la nuclear.
- ❖ El público en general, y los tomadores de decisiones en particular, desconocen los beneficios ambientales de las energías renovables.
- ❖ Las energías renovables no pertenecen al marco cultural actual. Por ejemplo, existen zonas sumamente asoleadas, con proveedores de equipos solares bien acreditados, donde no se instala ni un solo calentador solar de agua.
- ❖ No se valora en México la cobertura energética de largo plazo.

- ❖ En el caso de la energía eólica hay, a nivel mundial, un rechazo local por el problema de la contaminación visual; ello probablemente se reproducirá en México en la medida en que se empiecen a instalar granjas eólicas en nuestro país. El síndrome de “no en mi patio trasero” (“not in my backyard”, o NIMBY) se va extendiendo a la eólica; cuando las fotovoltaicas se vuelvan más atractivas, es probable que esto también ocurra. No así con las basadas en plantaciones energéticas (biomasa), geotermia, o mini/micro hidráulicas.

1.5.3 Posible evolución futura

En cuanto a los posibles escenarios futuros también podemos citar a continuación algunos de ellos.

Políticos:

- ❖ Crecerá el interés de políticos locales originales para desarrollar oportunidades independientes de la Federación, lo que favorecerá el desarrollo de las energías renovables.

Legales:

- ❖ El desincentivo de la Comisión Federal de Electricidad para incorporar energías renovables, debido a su obligación de comprar la energía más barata (por kwh), se resuelve modificando la ley reglamentaria de electricidad, posiblemente dando a la Comisión Federal de Electricidad libertad de autogestión, lo que podría animarla a incorporar energías renovables con más entusiasmo.
- ❖ El monopolio del estado para la generación eléctrica podría desaparecer en el corto o mediano plazo.

Administrativos/Institucionales:

- ❖ Habrá un recambio generacional en la cúpula de la CFE, lo que podría traducirse en una mayor apertura para que incorpore energías renovables.
- ❖ Las energías renovables podrían incorporarse en las perspectivas del sector energético.
- ❖ Se establecerá un programa para la incorporación de las energías renovables en las instalaciones de los tres niveles de gobierno.
- ❖ Se definirán los roles que las distintas instancias gubernamentales deben jugar en la promoción e incorporación de las energías renovables.
- ❖ La CFE, por las presiones que está recibiendo de la industria, cambia su actitud conservadora en los criterios para calcular el costo de posteo y su exigencia de una capacidad de respaldo muy alta a los auto consumidores cuya energía eléctrica generada tiene que

inyectarse y transportarse por la red lo que podría incrementar la inversión de privadas en la energía eólica.

Económicos/Financieros:

- ❖ Los precios del petróleo probablemente tendrán aumentos radicales y por largo plazo (por múltiples razones).
- ❖ Los costos de las energías renovables tenderán a la baja como resultado de la investigación y desarrollo tecnológico (en unas más que otras). Fuera de los sistemas fotovoltaicos, donde podría haber un quiebre al descubrirse un material adecuado con el cual el costo se pudiera reducir en forma de una función escalón, el costo en todas las demás se reducirá de manera gradual (tendencial).
- ❖ El incremento de costo por razones ambientales de los otros energéticos primarios podría hacer que las energías renovables fuesen competitivas.
- ❖ Se reducirá notablemente el costo de los generadores eoloeléctricos.
- ❖ Probablemente se desarrollarán esquemas de promoción económica para las energías renovables por parte del estado (por ejemplo, excepción de impuestos los primeros años, menores impuestos por energía “limpia”, etc.).
- ❖ Se logrará consenso entre las partes interesadas en la planeación del sistema eléctrico nacional sobre la necesidad de adoptar criterios de planeación que tomen en cuenta los beneficios económicos de la diversidad de fuentes como instrumento de administración de riesgo de los precios de los combustibles.
- ❖ Probablemente se avanzará en la construcción y divulgación de casos de éxito en la aplicación de las energías renovables, mediante organizaciones modernas, lideradas por la iniciativa privada, sin participación del gobierno.

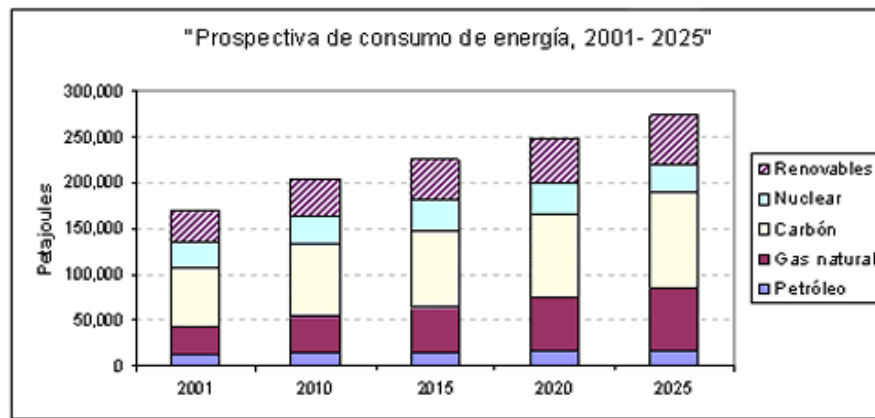
Tecnológicas:

- ❖ Probablemente se incrementará el financiamiento para actividades de prospección y caracterización de los recursos energéticos renovables y la información obtenida se integrará en un sistema de información geográfica.
- ❖ Las tecnologías de aprovechamiento de la energía eólica evolucionarán haciendo que los menos generadores eólicos sean menos sensibles a variaciones de tensión en la red.
- ❖ Podría darse un desarrollo tecnológico acelerado que redujese los precios unitarios de producción de las tecnologías de aprovechamiento de las energías renovables.
- ❖ Por falta de inversión en redes de distribución podría bajar notablemente la calidad y certidumbre de las soluciones convencionales, lo que haría más atractivas a las energías renovables.

- ❖ La falta de regulaciones regionales sobre el uso del suelo y el acceso a recursos energéticos deja de ser (hacia el año 2020) una barrera de entrada para las energías renovables, gracias al desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía por bombeo.
- ❖ Se desarrollarán los contratos de interconexión a la red de energía eléctrica para las energías renovables.

Sociales/Culturales:

- ❖ El desarrollo de una cultura de la autosuficiencia en el ámbito individual y colectivo podría hacer que parte de la población voltease hacia las energías renovables (en hogares, edificios y comunidades).
- ❖ El tema de las energías renovables podría incorporarse en los programas de educación media, básica y superior, y podrían crearse especialidades sobre el tema en las carreras profesionales.
- ❖ Los medios de comunicación masiva podrían lanzar campañas de información sobre los beneficios de las energías renovables.
- ❖ Por disminución importante de la calidad de vida en las grandes ciudades podrían desarrollarse flujos migratorios desde las zonas urbanas hacia las rurales (reurbanización), creando una demanda para las energías renovables en sistemas aislados.



Fuente: elaboración propia de los autores con datos de la IEA (2004).

Figura 1.5.3: Evolución mundial de la demanda de energía para la producción de electricidad (2001-2025).

Fuente: Elaboración propia de los los autores con datos de la IEA

CAPITULO 2

2. Recurso Eólico.

2.1 Como se origina el viento.

2.1.1 Circulación general de la atmósfera.

2.1.2 Fuerza de coriolis.

2.1.3 Sistemas de vientos.

2.2 Antecedentes de la utilización del viento.

2.3 Determinación del potencial energético del viento.

2.4 Distribuciones teóricas de densidad de probabilidad de velocidad del Viento.

2.4.1 FDP de Weibull.

2.4.2 FDP Normal.

2.4.3 FDP de Rayleigh.

2.5 Energía Eólica en el mundo.

2.6 Recurso eólico en México.

2.7 Evaluación del recurso eólico .

2.7.1 Toma de datos de velocidades y dirección del viento.

2.7.2. Que es una estación meteorológica automática.

2.7.3 Perfil vertical de la velocidad del viento.

2.7.4. Perfil logarítmico.

2.7.5. Perfil de ley de potencia.

2.7.6. Variación de la densidad del aire respecto a la altura.

2.7.7. Límite de Betz.

2.- RECURSO EOLICO

2.1 Como se origina el viento.

El movimiento del aire es originado por el diferente calentamiento de la superficie terrestre, presentando zonas de mayor o menor presión, donde el flujo de aire se dirige de las altas a las bajas presiones. Los vientos en la tierra son de varias clases, estos vientos se forman gracias a factores terrestres que se ven influenciados por la temperatura, la geografía y su ubicación frente al océano. El entendimiento del movimiento de los vientos es especialmente cuando el hombre pudo ver por primera vez el globo terrestre desde el espacio.

El gradiente de presión es la relación entre la diferencia de presión de los sitios y las distancias que los separa. Mientras mayor sea el gradiente de presión la velocidad del viento será mayor.

Como la mayoría de las fuentes de energía terrestres, en última instancia viene del sol. El sol irradia 174.423.000.000.000 kilovatios/hora de energía a la tierra. Es decir, en una hora la tierra recibe 1.74×10^{17} vatios de energía.

Más de 15.000.000 millones de Kw/h de electricidad se generan anualmente en todo el mundo. De esto, cerca del 65% es producido utilizando combustibles fósiles y el resto se obtiene de otras fuentes de energía, incluyendo nuclear, hidráulica, geotérmica, biomasa, solar y eólica.

Solamente cerca del 0.3% de esta energía es generada convirtiendo la energía cinética del viento en energía eléctrica, sin embargo, el uso del viento para la generación eléctrica se ha extendido rápidamente en años recientes, debido en gran parte a mejoras tecnológicas y a la maduración de la industria respecto a la creciente preocupación por reducir las emisiones asociadas a la quema de combustibles fósiles.

2.1.1 Circulación general de la atmósfera

Como las regiones ecuatoriales reciben más calor que las polares, existe un desplazamiento de aire entre las latitudes altas y bajas. En el ecuador el aire caliente asciende y disminuye la presión cerca del suelo, al paso que aumenta por encima de este. El resultado es que cerca de la superficie la presión atmosférica es mayor en los polos que en el ecuador, mientras que en las capas de aire más elevadas la situación es inversa. Para equilibrar esas diferentes presiones el aire ecuatorial pasa hacia los polos en las regiones altas, mientras que el polar se desplaza hacia el ecuador cerca de la superficie terrestre.

Esta descripción general tiene complicaciones y particularidades, pues el aire ecuatorial calentado asciende y se desvía hacia los polos, se enfría gradualmente a medida que avanza y desciende a la tierra a una latitud aproximada de 30° Norte y Sur. Parte de esta corriente retorna hacia la región de baja presión constante en el ecuador, mientras que el resto sigue su camino hacia el polo, pero a nivel del suelo.

Finalmente, ese aire enfriado, que llega hasta los límites del polo, se encuentra con otro más denso, que se separa del polo hasta una latitud de 60°, y se eleva sobre el mismo.

Este proceso nos indica que, además de la región de baja presión existente en el ecuador y las de elevada presión de los polos, hay círculos de presión intermedia: uno, de alta presión, alrededor de la latitud de 30°, determinado por el aire descendente; y otro, de baja presión, alrededor de la latitud de 60°.

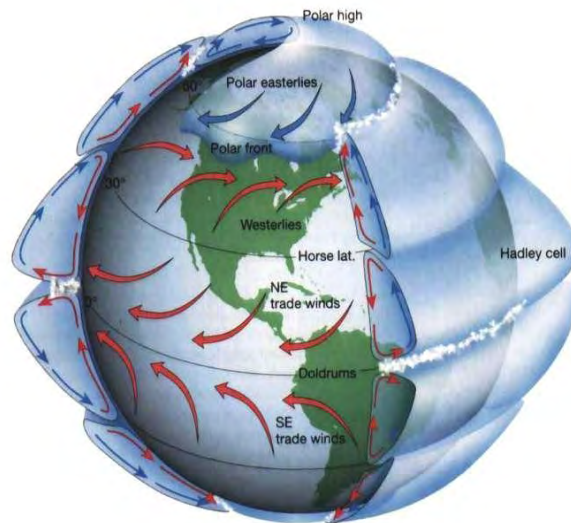


Figura 2.1: Dibujo esquemático de la circulación general de la atmósfera

Fuente: página web de la Universidad de Michigan-Ann Arbor, Departamento de Ciencias Geológicas.

2.1.2 Fuerza de coriolis.

Son fuerzas aparentes, responsables de la desviación de la trayectoria de un cuerpo que se mueve sobre una superficie que rota, tiene origen en la rotación de la tierra y está definida como:

$$F_c = 2\omega \times \text{sen}(\varphi) \times V \dots \dots (2).$$

De donde ω es la velocidad angular de la Tierra (7.29×10^{-5} rad. /s), φ (expresada en grados) es la latitud y V es la velocidad del viento (m/s).

Debido a este fenómeno en el hemisferio norte el viento tiende a girar en el sentido contrario a las manecillas del reloj cuando se acerca a áreas de baja presión. En el hemisferio sur el viento gira en sentido de las manecillas del reloj cuando se acerca a áreas de baja presión.

Una manera más fácil de explicar sería la siguiente: a la rotación de la tierra, el viento viaja del Ecuador al polo Norte haciendo este una curva hacia la derecha, en caso de que el viento viaja del ecuador hacia el polo Sur el viento hace una curva hacia la izquierda.

En la Tierra, por ejemplo, la trayectoria de un objeto, como un hipotético proyectil disparado desde el Ecuador hacia el polo Norte, en lugar de ir en línea recta, se desvía hacia el Este. Obviamente, si la trayectoria va desde el Ecuador hacia el polo Sur, la fuerza de Coriolis impulsa al cuerpo en dirección Oeste.

Este fenómeno es debido al hecho de que la velocidad de rotación, con la que está animado un cuerpo en el Ecuador, es mayor que la que posee el propio cuerpo en proximidad de los polos

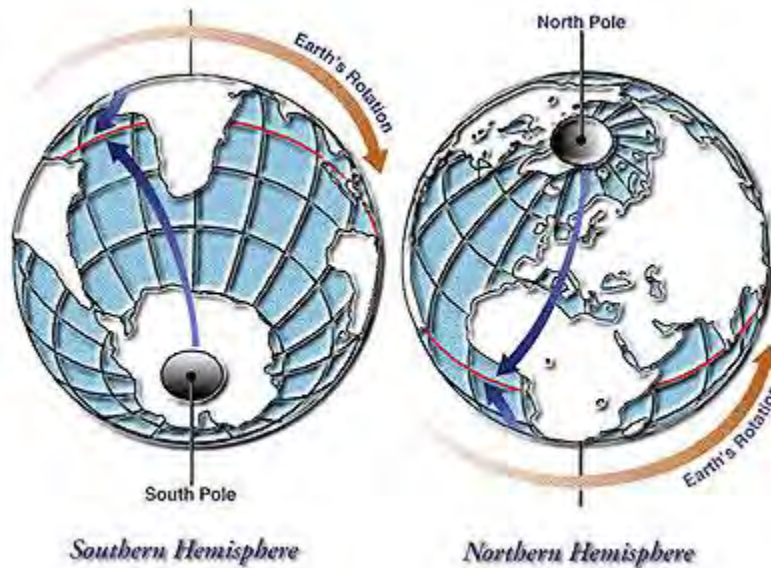


Figura 2.1.2 fuerza de coriolis

Fuente: www.dforceblog.com/.../energía-eólica-la-fuerza-de-coriolis

2.1.3 Sistemas de vientos

Vientos locales

Aunque los vientos globales son importantes en la determinación de los vientos dominantes de un área determinada, las condiciones climáticas locales pueden influir en las direcciones de viento más comunes. Los vientos locales siempre se superponen en los sistemas eólicos a gran escala, esto es, la dirección del viento es influenciada por la suma de los efectos global y local. Cuando los vientos a gran escala son suaves, los vientos locales pueden dominar los regímenes de viento.

Brisas marinas

Durante el día la tierra se calienta más rápidamente que el mar por efecto del sol. El aire sube, circula hacia el mar, y crea una depresión a nivel del suelo que atrae el aire frío del mar. Esto es lo que se llama brisa marina (figura 2.1.2A). A menudo hay un periodo de calma al anochecer, cuando las temperaturas del suelo y del mar se igualan.

Durante la noche los vientos soplan en sentido contrario. Normalmente durante la noche la brisa terrestre tiene velocidades inferiores, debido a que la diferencia de temperaturas entre la tierra y el mar es más pequeña.

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

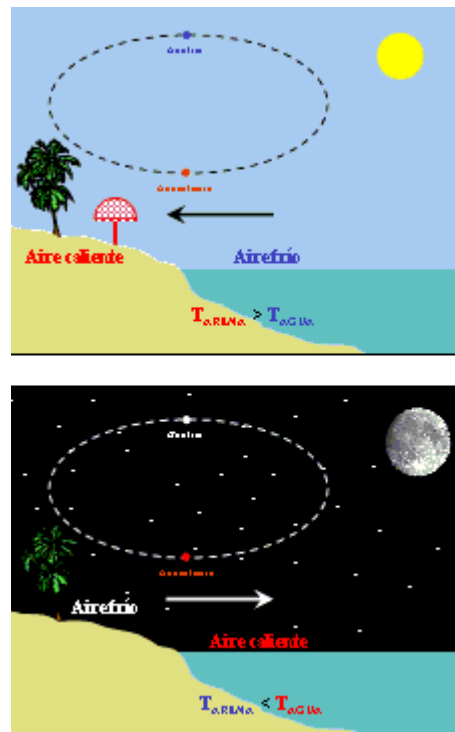


Figura 2.1.2a Brisa marina
Fuente: elblogboyacense.com

Sistemas de valle-montaña

Es un fenómeno similar al anterior el que origina la brisa de valle y la brisa de montaña. La primera se refiere a la ascensión de aire frío del valle durante las horas de insolación por las laderas de una montaña. La brisa de montaña se presenta al caer la tarde cuando las masas de aire en contacto con ella pierden calor por la irradiación de la superficie de las laderas

Vientos Orográficos

Un ejemplo es el viento del valle que se origina en las laderas que dan al sur (ó en las que dan al norte en el hemisferio sur). Cuando las laderas y el aire próximo a ellas están calientes la densidad del aire disminuye, y el aire asciende hasta la cima siguiendo la superficie de la ladera. Durante la noche la dirección del viento se invierte, convirtiéndose en un viento que fluye ladera abajo. Si el fondo del valle está inclinado, el aire puede ascender y descender por el valle; este efecto es conocido como viento de cañón (figura 2.1.2B).

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

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



Figura 2.1.2B Vientos de montaña.

Fuente: Asociación danesa de la industria eólica.

2.2 Antecedentes de la utilización del viento

Las primeras máquinas que aprovecharon el viento fueron probablemente los molinos de viento de eje vertical usados para moler granos en Persia (actualmente Irán) alrededor del 200 B.C. Tenían un cierto número de brazos en los cuales se montaban velas, las cuales originalmente estaban hechas de cañas. Los molinos de viento de eje horizontal aparecieron en la región mediterránea alrededor del siglo 10 y estaban emplazados de forma permanente de cara a los vientos marítimos que predominantes.

Los primeros molinos de viento europeos aparecieron en el siglo XIII, y poseían un mecanismo manual que rotaba todo el molino de viento para orientarlo frente al viento. Estos molinos eran utilizados para moler granos y bombear agua.

El molino de viento holandés del siglo XV tenía un cuerpo fijo y un casquillo rotativo con un veleta que apuntaba las paletas al viento (figura 2.2).

Estas máquinas tenían paletas con diámetros de hasta 25 m y salidas de energía de hasta 30 kilovatios con vientos favorables. En general, tenían alrededor de un cuarto de la eficacia de los de turbina de viento de generadores modernos.

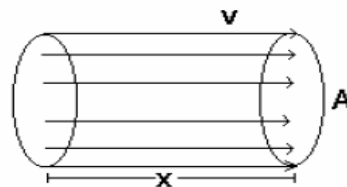
Estas máquinas llegaron a extenderse mucho hasta final del siglo XIX cuando, por ejemplo, Holanda tenía cerca de 9000 molinos. Menos de 1000 de estas máquinas aún continúan funcionando.

Hoy día, gracias a aspas y hélices muy sofisticadas, se construyen modernos molinos de viento que contienen generadores especiales para producir electricidad. Es común observar grupos de molinos, colocados en fila, con el objeto de sumar toda la energía que puedan producir y atender así las necesidades de electricidad de pequeños poblados.



Figura 2.2 Molino Holandés
Fuente: guia.ojodigital.com

2.3 Determinación del potencial energético del viento



La energía cinética de un volumen de aire en movimiento es:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

Donde m es la masa y v es la velocidad. La masa puede expresarse como:

$$m = \rho V \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

Siendo ρ la densidad del aire y V el volumen de aire en movimiento.

Dado que el volumen de aire V puede ser expresado en función de la distancia recorrida x en un intervalo de tiempo t y del área transversal del volumen de aire A, es decir:

$$V = x A = v t A \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

Finalmente tenemos que la E_c puede ser expresada por:

$$E_c = \frac{1}{2} \rho A v^3 t \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

La potencia del viento será entonces:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

2.4 Distribuciones teóricas de densidad de probabilidad de velocidad del viento.

Las estimaciones de la producción de energía se realizan combinando los conocimientos sobre el viento en un sitio específico y la información relativa al funcionamiento de un sistema conversor de energía eólica (SCEE). Habitualmente, esta información sobre la máquina consiste en una función que refleja el funcionamiento uniforme de la misma. Esta función es la relación entre la producción de energía y velocidad del viento cuando la máquina funciona de manera absolutamente uniforme, con flujo homogéneo. Sin embargo, en la realidad el funcionamiento de una máquina diferirá del predicho mediante las características de funcionamiento uniforme, ya que el viento es turbulento y la acción mutua entre la máquina y el viento resulta bastante complicada.

Se pueden sin embargo realizar estimaciones de la producción de energía durante largos períodos de tiempo como un mes, una estación o un año, sumando series

cronológicas de estimaciones de producción de energía determinadas a partir de las series cronológicas del promedio de la velocidad del viento y de las características de funcionamiento de la máquina. También se puede calcular el promedio de producción de energía si la función de densidad de probabilidad (PDF) de la velocidad del viento es conocida en el lugar de que se trate. La PDF indica la probabilidad de que la velocidad del viento tenga un valor dentro de un intervalo determinado. En un sitio determinado, la forma exacta de la FDP dependerá del intervalo de tiempo sobre el que se ha promediado la velocidad del viento y del período total al que se aplique la FDP.

2.4.1 FDP de Weibull.

La FDP de Weibull puede ser descrita por dos parámetros, k llamado factor de forma y c llamado factor de escala. La expresión para esta FDP es:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \dots\dots\dots (2.6)$$

En la que k es el factor de forma, c es el factor de escala y v es la velocidad del viento.

2.4.2 FDP Normal.

La FDP normal también llamada Gaussiana depende de la velocidad media y de la desviación estándar. Su expresión es:

$$f(v) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{(v-v_m)^2}{2\sigma^2}\right)} \dots\dots\dots (2.7)$$

Donde v_m es la velocidad media y σ es la desviación estándar. Cuando v es expresada en términos de unidades estándar:

$$t = \frac{(v - v_m)}{\sigma} \dots\dots\dots (2.8)$$

La ecuación para la función de densidad de probabilidad en forma estándar será:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{t^2}{2}\right)} \dots\dots\dots (2.9)$$

2.4.3 FDP de Rayleigh.

La FDP de Rayleigh es un caso especial de la FDP de Weibull cuando el factor de forma $k=2$. De esta manera la FDP de Rayleigh sólo depende del factor de escala c y de la velocidad. La expresión de la FDP de Rayleigh es la siguiente:

$$f(v) = \left(\frac{2v}{c^2}\right) e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2} \dots\dots\dots (2.10)$$

2.5 Energía eólica en el mundo.

Un total de 27,051 MW eólicos se instalaron en todo el mundo a lo largo de 2008, según el Consejo Mundial de la Energía Eólica (Global Wind Energy Council- GWEC). La cifra representa un incremento de 36.1% respecto a los 19,865 MW nuevos instalados el año anterior. La potencia total acumulada en el mundo fue de 120,798 MW a finales de 2008, un 28.7% más que en 2007.

Todavía hay mucho lugar para crecer, pues solamente una pequeña parte del potencial eólico utilizable está siendo aprovechado en el mundo. La aplicación de regulaciones adecuadas hacia la industria eléctrica y el otorgamiento de incentivos suficientes por parte de los gobiernos, permite adoptar la energía eólica de manera más rápida y eficiente. Las políticas eficaces ayudan a allanar el camino y aseguran que la energía eólica compita con otras fuentes de energía en el mercado eléctrico.

Lo que está claro es que es inexacto pensar que la falta de recursos eólicos sea un factor limitante en la utilización de la energía eólica para la generación de electricidad. Los recursos eólicos mundiales se estiman en 53,000 TWh/año, en tanto que el consumo mundial de energía eléctrica está previsto que se incremente hasta los 25,818 TWh/año en 2020. El recurso eólico mundial total disponible y técnicamente recuperable supera por más del doble la proyección de la demanda eléctrica mundial.

La potencia eólica mundial instalada se ha incrementado en más de un 60% en los últimos cuatro años, pasando de 47,620 MW en 2004 a 120,798 MW en 2008, es decir, en estos cuatro años se han instalado 73,178 MW. El 87.8% de la capacidad instalada en 2008 han sido emplazados en diez países, destacando en primer lugar Estados Unidos con 8,358 MW, situándose con un 30.9% de la potencia total instalada a nivel mundial. Le sigue China con 6,300 MW, lo que le permitió doblar la potencia eólica instalada por cuarto año consecutivo e incrementarla en 6.3 GW, alcanzando así un total de 12.2 GW instalados a finales del año 2008.

De esta forma, Estados Unidos, China, India, Alemania y España son mercados líderes y son las regiones de Europa, Norteamérica y Asia las que muestran los más altos índices de crecimiento en el mundo.

Europa. La Unión Europea sigue siendo el líder del mundo en capacidad de energía de viento total instalada y una de las regiones más fuertes para el nuevo desarrollo, con más de 8.9 GW de la nueva capacidad instalada en 2008. Las estadísticas de la industria compiladas por la Asociación de Energía Eólica Europea (EWEA) muestran que la capacidad de viento acumulada en Europa aumentó en 15 % para pasar de 56,535 MW a finales de 2007 y alcanzar un nivel de 64,949 MW a finales de 2008. Actualmente hay una clara diversificación del mercado europeo, representando una proporción cada vez menor los mercados eólicos tradicionales de Alemania, España y Dinamarca.

La diversificación geográfica ha sido una de las principales fortalezas de la industria eólica Europea. En el año 2008 se presentó una extensión del mercado eólico de manera más equilibrada, con “una segunda onda” en la cual Italia, Francia y el Reino Unido, fueron los países más representativos de esta nueva tendencia. Diez de los 27 Estados miembros de la Unión Europea ahora tienen más que 1GW de la capacidad eólica cada uno.

Norteamérica. Por su parte, la industria de viento estadounidense siguió creciendo a un paso excepcional. La industria ha crecido a un promedio de 32 % anual durante los pasados cinco años. En 2007, la industria creció en 45 %, añadiendo 5,244 MW a los 11,575 MW existentes en 2006 en su capacidad de generación eólica. Sin embargo, en 2008 el aumento fue del 50 % en un solo año. La capacidad total de viento en los Estados Unidos es ahora de más de 25,170 MW, produciendo suficiente electricidad para impulsar el equivalente de aproximadamente 7 millones de casas y alcanzar más del 1 % de la demanda de electricidad estadounidense total.

Latinoamérica. Ningún país latinoamericano está en la lista de los veinte mercados eólicos mundiales más importantes. Brasil y México son los países latinoamericanos que cuentan con potenciales importantes de recursos eólicos que pueden ser explotados en el mediano y largo plazos con un marco regulatorio más claro y transparente y con incentivos económicos reales en el corto plazo.

Asia. El año de 2008 fue otro año de desarrollo impresionante de la energía eólica en China. Este país dobló su capacidad instalada total por cuarto año consecutivo. La nueva capacidad instalada sumó 6.3 GW en 2008, un aumento del 91 % sobre el obtenido en 2007. La capacidad de energía eólica acumulada de China se encuentra ahora en 12.2 GW, haciendo al mercado Chino el segundo más grande del mundo. Durante 2008, la recién creada Administración de Energía Nacional de China destacó a la energía eólica como una prioridad para diversificar su base de fuentes de energía, la cual se encuentra basada fuertemente en el carbón. La oficina seleccionó seis regiones y provincias con los mejores recursos eólicos: Xinjiang, Mongolia Interior, Jiuquan, Gansu, Hebei y Jiangsu. Cada sitio tendrá más de 10 GW de la capacidad instalada en 2020. Este despliegue de energía

eólica de gran escala es llamado el Programa de Base de Viento de Tamaño de 10 GW (Base de Viento).

En India el crecimiento del mercado de energía eólica ha sido estable y con crecimiento constante. En 2008, 1,800 MW de nueva capacidad eólica fue instalada, llegando hasta más de 9.6 GW de capacidad total acumulada. Esto representó un crecimiento anual del 22.9 %. El crecimiento de esta capacidad en India se ha concentrado en sólo algunas regiones, sobretodo en el estado del sur del tamil Nadu, que mantiene su posición como el estado con la instalación de capacidad de viento más grande, con 4,118 MW instalados al final de 2008.

Australia / Pacífico En 2008 la región Asia-Pacífico también observó un alto dinamismo en su crecimiento anual. Australia al igual que Nueva Zelanda fueron los mercados más representativos con un crecimiento de 41.9 % de 2007 a 2008. Juntos, ambos países instalaron 486 MW comparado con 1,158 MW en 2007. La Conferencia Mundial de Energía Eólica (WWEC) en 2010 en Rio de Janeiro discutirá como continuar y extender este desarrollo dinámico de la industria eólica en diferentes regiones del mundo, incluyendo esta.

África. En África a finales de 2008 se instalaron 130 MW. Egipto pudo conservar su posición número uno en el continente africano con instalaciones totales de 365 MW. Solamente se logró un pequeño progreso en el resto de los países africanos, sin embargo, se esperan nuevas instalaciones en un futuro cercano, en Marruecos, Egipto, Túnez y Sudáfrica.

Considerando la gran necesidad de abastecimiento de energía sustentable en mucho países africanos, se tendrán que desarrollar e implementar estrategias de desarrollo que incluyan aplicaciones autónomas tan pronto como sea posible con objeto de aprovechar los enormes potenciales eólicos para el beneficio de la gente africana, de los cuales una minoría tienen acceso a la red pública.

2.6 Recurso eólico en México.

Existen muchas regiones con potencial eólico en nuestro país (figura 2.6) entre algunas de las que se han estudiado podemos citar:

Sur del Istmo de Tehuantepec.

Esta región contiene un área del orden de 1000 Km. cuadrados expuesta a vientos muy intensos, dado un fenómeno monzónico entre el Golfo de México y el Golfo de Tehuantepec, donde aflora una corriente marina anormalmente caliente, originando un gradiente térmico y de presión que da lugar a un intenso viento del norte desde el otoño hasta la primavera. Esta región, considerando la infraestructura eléctrica existente y otros usos del suelo podría asimilar una capacidad instalada del orden de los 2000 a 3000 MW, con un factor de planta medio de 0.45. En las zonas más propicias, con factores de planta del 0.6 anual y de 0.9 o más en el otoño e invierno. En las inmediaciones del poblado de La Venta, Oaxaca, se instaló en 1994 la primera mini central eoloeléctrica en México,

con una capacidad de 1,575 Kw., constituida por siete aerogeneradores de 225 Kw.

Península de Baja California.

Esta península es interesante eoloenergéticamente, por varias razones, su extensión geográfica, su baja densidad poblacional y eléctricamente alimentada por sistemas aislados, cuando eólicamente es una barrera natural perpendicular a los vientos occidentales, que en sus montañas e innumerables pasos puede proporcionar muchos sitios con potencial explotable. El poblado de la Rumorosa y zonas aledañas, así como el paso entre la Sierra de Juárez y la Sierra de San Pedro Mártir, por donde cruza la carretera y la línea eléctrica de Ensenada a San Felipe en el Golfo de California, son regiones identificadas con alto potencial eólico, que son indicativas de lo que puede encontrarse en muchos otros lugares de la península.

Península de Yucatán.

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

Altiplano norte.

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

Región Central.

En la región central del altiplano, prevalecen los vientos alisios de verano, desde Tlaxcala a Guanajuato, que en Pachuca, la bella airosa, son más conocidos. Estos vientos complementan estacionalmente, a los del altiplano norte y los del sur del Istmo de Tehuantepec. La complejidad orográfica de esta región, debe dar lugar a la existencia de innumerables pasos y mesetas donde el viento sea energéticamente aprovechable.

Las costas del país.

El extenso litoral mexicano y sus islas, presenta por lo menos condiciones para generación eléctrica en pequeña escala y almacenamiento en baterías, sistemas híbridos diesel-eólicos y en otros generación interconectada. La generación eoloeléctrica en gran escala en las costas para la producción de hidrógeno, constituirá una de las principales aplicaciones a mediados del próximo siglo.

A mediados del próximo siglo, cuando las termoeléctricas a combustóleo y carbón sean historia, y la población en México se establezca alrededor de los 130 millones de mexicanos, nuestro sistema eléctrico deberá alcanzar del orden de los 125,000 MW instalados, en esas condiciones, la energía eólica podrá contribuir con la generación eléctrica de el orden de 30,000 MW instalados de aerogeneradores, un gran porcentaje de ellos produciendo hidrógeno para centrales turbogas.



Figura 2.6: Energía del viento dominante en México.
Fuente: instituto de Geografía de la UNAM.

2.7 Evaluación del recurso eólico.

2.7.1 Toma de datos de velocidades y dirección del viento.

El parámetro más importante para la determinación de un estudio del potencial eólico de un lugar es el conocer y medir la presencia del viento en el lugar. Para poder conocer este potencial se necesita instalar en el lugar equipo especializado para el registro del mismo. El equipo indispensable para este trabajo es un anemómetro y también una veleta, la cual nos registra la dirección del viento.

Es importante decir que para obtener una medición veraz de las velocidades del viento en un sitio dado se requiere la instalación de varios anemómetros de alta calidad y que estén adecuadamente referenciados y calibrados con instrumentos patrones, dichos instrumentos deberán presentar errores de medición menores al 1% para asegurar que los datos obtenidos durante la medición sean confiables y

puedan ser utilizados en los cálculos de obtención de potencial eólico del lugar de interés.

La importancia de conocer la dirección del viento se debe a la finalidad de conocer la estabilidad del flujo del viento y determinar que no se trata de un sitio donde ocurran incrementos de la velocidad del viento como consecuencia de rachas de turbulencias.

La mejor forma de medir la velocidad del viento es situar el equipo de medición a la altura en la cual se va a situar la torre de generación eólica, con el fin de evitar la incertidumbre que conlleva el hacer la extrapolación a la altura que se desea hacer la instalación. En la práctica se llegan a instalar de 2 a 3 anemómetros a distintas alturas ya que con ello se contará con información más fehaciente de los datos de velocidad del viento. Además utilizando varios anemómetros permite estimar con mayor exactitud el perfil de velocidades en función de la rugosidad del terreno.

En la práctica, para conformar una red anemométrica, es común colocar torres de medición con una separación de 1 kilómetro entre ellas, cuando se trata de terrenos llanos con poca vegetación, o bien una separación de 200 metros en terrenos con mucha vegetación. Los datos de la red anemométrica y su análisis estadístico permitirán una mejor evaluación del comportamiento del recurso eólico en la totalidad del terreno.

“Para saber qué tipo de mediciones son las más adecuadas se ha encontrado que es mediante el análisis del “espectro energético del viento $S_d(f)$ ”, mismo que se muestra en la figura 2.7.1. La interpretación física del espectro es la siguiente: toda el área bajo la curva representa la variación total (el cuadrado de la desviación estándar $-\sigma^2$) del viento, por lo mismo, el valor local de S_d es representativo de la contribución a la variancia total de las fluctuaciones con periodo T .

Lo que es evidente en la figura 2.7.1. Es que hay muy poca contribución de σ^2 para los periodos comprendidos entre 2 horas y 5 minutos. Esto se conoce como la “depresión espectral” del espectro energético del viento, cuyo valor mínimo se alcanza para periodos de 10 minutos. Por ello, la velocidad promedio del viento medida en un periodo de 10 minutos se ha considerado como la *velocidad estacionaria*. Las fluctuaciones asociadas con periodos mayores de 2 horas, representan procesos macro meteorológicos (ciclos de insolación, frentes, tormentas), mientras que las fluctuaciones asociadas con periodos menores que cinco minutos representan procesos micro-meteorológicos (rachas, turbulencias)”.

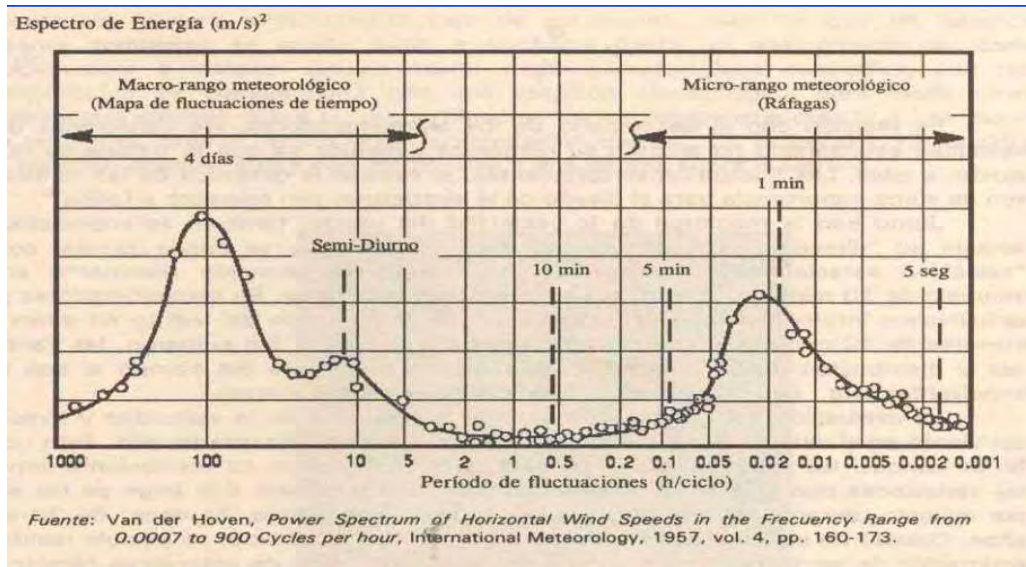


Figura 2.7.1: Espectro de energía del viento.
 Fuente: Van der Hoven, vol. 4 pp. 160-.173

Así los valores de la desviación estándar son menores para periodos de 10 minutos, por lo que se ha determinado este valor de velocidad como velocidad estacionaria.

Para mediciones discretas, la velocidad estacionaria se estima de la siguiente ecuación:

$$V_e = \left(\frac{1}{N} \right) \sum_{i=1}^N V_i \dots\dots (2.11)$$

Donde N es el número de muestras de la velocidad del viento durante un intervalo de 10 minutos, V_i son los valores medidos de la velocidad del viento, en el intervalo de 10 minutos.

Con base a lo anterior, con fines de obtener una cuantificación del recurso eólico durante periodos diarios, mensuales o anuales, se determina que la velocidad promedio, V_T , mediante la estimación anterior de la velocidad estacionaria (obtenida en la ecuación anterior a intervalos de 10 minutos) se expresa en unidades de (m/s) y queda dada en los siguientes términos:

$$V_T = \left(\frac{1}{N} \right) \sum_{i=1}^N V_{ei} \dots\dots (2.12)$$

La Rumorosa, es una localidad del municipio de Tecate, Baja California; México. Es una parte natural de la carretera entre Mexicali y Tecate, la cual está ubicada en la parte más alta.

Para llevar a cabo esta evaluación se facilito por parte del servicio meteorológico nacional información de la estación meteorológica automática BC07, cuyas coordenadas de ubicación son 32°16'20"N, 116°12'20"O, altitud 1262 metros

sobre el nivel del mar, misma de la que se obtuvieron datos como son: dirección y velocidad del viento, temperatura promedio del aire, humedad relativa, presión barométrica Densidad de flujo de energía de radiación solar, etc.

2.7.2. Que es una estación meteorológica automática

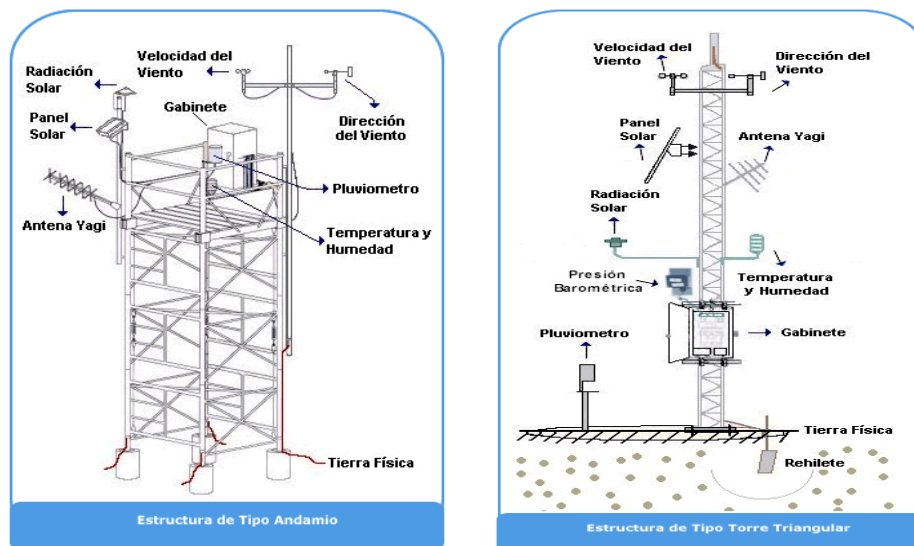
Es un conjunto de dispositivos eléctricos y mecánicos que realizan mediciones de las variables meteorológicas de forma automática (sobre todo en forma numérica). Una Estación Meteorológica Automática, está conformada por un grupo de sensores que registran y transmiten información meteorológica de forma automática de los sitios donde están estratégicamente colocadas. Su función principal es la recopilación y monitoreo de algunas Variables Meteorológicas para generar archivos del promedio de cada 10 minutos de todas las variables, esta información es enviada vía satélite en intervalos de 1 ó 3 horas por estación.

El área representativa de las estaciones es de 5 km de radio aproximadamente, en terreno plano, excepto en terreno montañoso

Sensores que integran la Estación

- Velocidad del viento
- Dirección del viento
- Presión atmosférica
- Temperatura y Humedad relativa
- Radiación solar
- Precipitación

Existen dos tipos de estructura donde van montadas las estaciones:



*Figura 2.7.2: Tipos de estructuras.
Fuente: Servicio Meteorológico Nacional*

2.7.3 Perfil vertical de la velocidad del viento.

La velocidad del viento tiene un comportamiento variable con la altura, dado que su perfil de velocidades es influenciado por la superficie terrestre a altitudes por arriba de los 100 metros. El viento es frenado por la rugosidad de la superficie de la tierra y por todos los obstáculos existentes (edificios, árboles, etc.). La velocidad del viento es directamente proporcional a la altura, es decir a menor altura el viento es afectado por la rugosidad de la superficie de la tierra, debido a que existe una mayor fricción y se llegan a generar turbulencias. (Figura 2.7.3)

Para poder modelar el comportamiento del viento a diferentes alturas existen dos métodos generales, uno es el método de perfil logarítmico y el otro es el de ley de potencias.

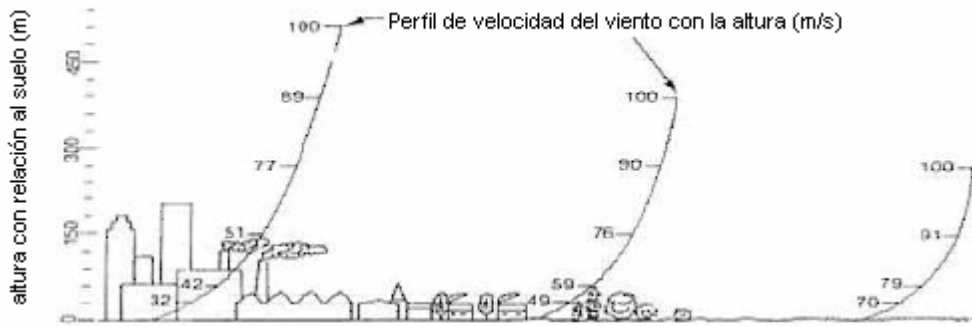


Figura 2.7.3: Perfil de velocidad del viento y su influencia con la altura.
Fuente: Wind Energy handbook 2001

2.7.4. Perfil logarítmico.

La expresión de perfil logarítmico se utiliza para la estimación de la velocidad del viento a una altura deseada, tomando como base un valor de la velocidad del viento conocido a una altura dada. La expresión del perfil logarítmico es:

$$\frac{V}{V_{ref}} = \frac{\ln\left(\frac{h}{h_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{ref}}{h_0}\right)} \dots\dots (2.13)$$

Donde:

V (m/s): es la velocidad estimada del viento a la altura deseada.

V_{ref} (m/s): es la velocidad del viento a la altura de referencia.

h (m) es la altura a la que se desea conocer la velocidad del viento.

h_{ref}. (m) es la altura de referencia, a las que se toma la medición.

h₀ (m) es la longitud de la rugosidad del terreno (Tabla 4.2).

2.7.5. Perfil de ley de potencia

Al igual que el perfil logarítmico, el perfil de ley de potencia modela el perfil vertical de velocidad del viento. Este modelo fue propuesto por Hellman en 1915 y se usa para estimar la velocidad del viento a una determinada altura con base a datos medidos a una altura determinada, dicha expresión es la siguiente:

$$V = V_{ref} \times \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha \quad \dots\dots (2.14)$$

Donde α es el índice de la ley de potencia para la velocidad del viento, el cual depende de la rugosidad del terreno. El parámetro α varía en relación al tipo de terreno por donde pasa el viento y por el efecto de varios parámetros como la elevación, la hora del día o la estación del año.

Existen métodos para el cálculo del valor de α entre los que se encuentran:

- a) Una primera correlación para el exponente de la ley de potencia como función de la velocidad y la altura. Creada en 1978, mediante una relación empírica:

$$\alpha = \frac{0.37 - 0.088 \ln(V_{ref})}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{h_{ref}}{10}\right)} \quad \dots\dots (2.15)$$

- b) Una correlación dependiente de la rugosidad de la superficie. Creada en 1975, de igual manera es una relación empírica, en la cual relaciona la longitud de la rugosidad del terreno (Tabla 2.7.1).

$$\alpha = 0.096 \log_{10} h_o + 0.016(\log_{10} h_o)^2 + 0.24 \quad \dots (2.16)$$

En la tabla 2.7.A. Se presentan valores típicos de h_o y en la tabla 2.7.B de α utilizados en la relación ALFA

Descripción del terreno.	h_o ($\times 10^{-3}$ m)
Llano muy liso en hielo o lodo	0.01
Superficie nevada	3.0
Campo barbechado	30.0
Plantación	50.0
Suburbios	1500

Tabla 2.7.A Estimaciones para la longitud de rugosidad (h_o) (Tomado de Amílcar, 2007)

Descripción del terreno.	α
Liso (mar, arena, nieve)	0.10 – 0.13
Moderadamente rugoso (hierba, campos de cereales, regiones rurales)	0.13 – 0.20
Rugoso (bosques, barrios)	0.20 – 0.27
Muy rugosos (ciudades, altos edificios)	0.27 - 0.40

Tabla 2.7.B. Estimación de α respecto al terreno. (Tomado de Wind Energy handbook).

Se considera la relación 2.14 más apropiada para trabajar con nuestros datos recabados, ya que en esta no es necesario conocer las características físicas de la rugosidad del terreno y esta se relaciona con la ecuación 2.15 que de la misma manera no hace hincapié en la rugosidad del terreno.

2.7.6. Variación de la densidad del aire respecto a la altura.

Para estimar el flujo de viento se necesita conocer la variación de la densidad del aire en función de la altura.

Para obtener un dato de la densidad de la localidad de estudio y no se cuenta con registro alguno, pero en cambio se conoce con datos como lo es la altura a nivel del mar en el que se encuentra la localidad y la temperatura media del ambiente, se puede recurrir a la siguiente expresión:

$$\rho = 1.225 \exp \left[\left(\frac{-h}{8435} \right) - \left(\frac{T - 15}{288} \right) \right] \dots (2.17)$$

Donde h (m) es la altura del sitio sobre el nivel del mar (M.S.N.M) y T (°C) es la temperatura ambiente promedio del sitio. Las unidades de ρ son Kg/m³.

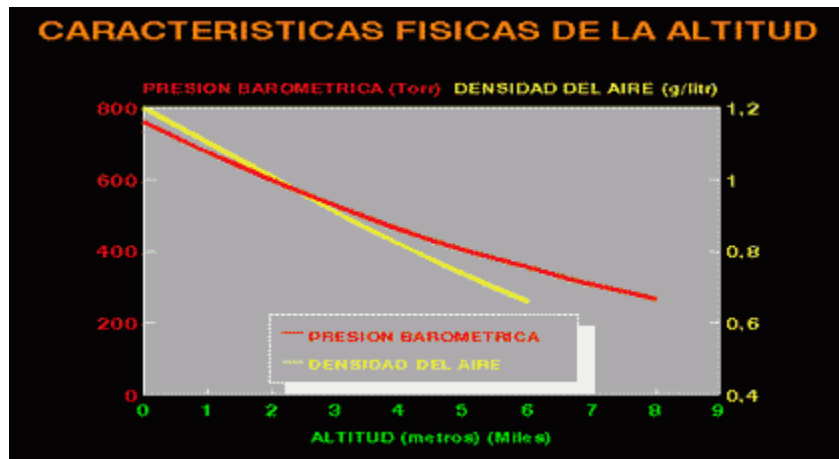


Figura 2.7.6. Comportamiento de la densidad del aire con respecto a la altitud.

Fuente: <http://www.biolaster.com/hipoxia>

Esto es determinante para los aerogeneradores con control por desprendimiento de flujo, que son los que mediante propiedades aerodinámicas limitan el torque producido por las aspas a altas velocidades, dicho de otra manera, esta corrección sirve para estimar la potencia obtenida mediante ciertas condiciones de densidad y se determina mediante la siguiente relación:

$$P_c = P_n \left(\frac{\rho}{\rho_{ref}} \right) \dots\dots\dots (2.18)$$

Donde:

P_c (W) es la potencia generada como función del aire atmosférico del sitio.

P_n es la curva de potencia del aerogenerador.

ρ_{ref} (Kg/m³) es la densidad del aire de referencia (comúnmente 1.225 Kg/m³).

ρ (Kg/m³) es la densidad del aire de la localidad.

Cuando se tiene aerogeneradores con control del ángulo de ataque, que reduce o aumenta el ángulo de incidencia del viento, para evitar riesgos a velocidades grandes se resuelve aplicar la ecuación:

$$V_c = V_n \left(\frac{\rho}{\rho_{ref}} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (2.19)$$

Donde:

V_c (m/s) es la velocidad corregida.

V_n (m/s) es la velocidad a la densidad del aire de referencia.

2.7.7. Limite de Betz.

De la ecuación 2.5, P es la potencia máxima que se puede obtener del viento de forma ideal, sin embargo un aerogenerador eoloelectrico no es capaz de transformar el total de la potencia que nos ofrece el viento. Es preciso saber de la potencia y de la energía que proporciona el viento no se puede extraer integralmente el total disponible, debido a que depende de la eficiencia y características del aerogenerador y de la maquina, siendo C_p el coeficiente de potencia, que expresa la fracción de potencia extraída por el rotor eólico y es un parámetro de diseño de cada máquina, así como de la velocidad del viento a la que se realiza el diseño.

Se considera el valor obtenido por Betz para las maquinas eólicas, similar al obtenido por Carnot en las maquinas térmicas, donde esto lo dedujo mediante la siguiente hipótesis:

- ❖ Las aspas trabajan sin fricción alguna.
- ❖ Las líneas de corriente que definen el volumen de control, separan perfectamente el flujo de aire perturbada del no perturbado.
- ❖ La presión estática en puntos suficientemente alejados del rotor coinciden con la presión estática de la corriente libre no perturbada.
- ❖ La fuerza desarrollada por unidad de área a lo largo del rotor es constante.
- ❖ El rotor no induce rotación alguna en la estela de salida.
- ❖ El fluido es ideal e incompresible.

Bajo esta hipótesis Betz dedujo que el máximo valor de potencia susceptible de ser extraído es:

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \rho A V^3 \quad \dots\dots (2.20)$$

Esta es la expresión que se conoce como fórmula de Betz y que proporciona la máxima potencia que podemos extraer de una corriente de aire.

La siguiente expresión nos hace referencia al desempeño de un generador eoloelectrico y es caracterizado por el C_p .

$$C_p = \left(\frac{P_{\max}}{P} \right) = \left[\frac{\frac{8}{27} \rho A V^3}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \right] = 0.593 \quad \dots\dots (2.21)$$

Como anteriormente se dijo C_p . representa el límite máximo de la fracción de la potencia en el viento que puede ser transformada en energía mecánica y luego en electricidad. Betz demostró que el valor máximo del C_p . para un aerogenerador es de 0.593, es decir que solo se puede extraer del viento el 59.3% de la potencia total contenida en el mismo.

CAPÍTULO 3

3. Tecnología Eólica.

3.1 Clasificación de los aerogeneradores por su aplicación.

3.1.1 Aerogeneradores para aplicaciones aisladas.

3.1.2 Aerogeneradores para centrales eoloeléctricas.

3.2 Configuración general de los aerogeneradores.

3.2.1 Principio de operación sistema conversor de energía .

3.2.2 Elementos que integran un sistema conversor de energía eólica.

3.3 Aplicaciones de la energía del viento.

3.3.1 Bombeo de agua.

3.3.1.1 Aerobombas mecánicas.

3.3.1.2 Aerobombas eléctricas.

3.3.2 Generación eléctrica.

3.3.2.1 Sistemas autónomos.

3.3.2.2 Sistemas interconectados.

3.3.2.3 Sistemas híbridos.

3.4 Instalación.

3.5 Localización.

3.- TECNOLOGÍA EÓLICA

Una turbina eólica es un dispositivo mecánico que convierte la energía del viento en electricidad. Las turbinas eólicas se diseñan para convertir la energía del movimiento del viento (energía cinética) en la energía mecánica, movimiento de un eje. Luego en los generadores de la turbina, ésta energía mecánica se convierte en electricidad. La electricidad generada se puede almacenar en baterías, o utilizar directamente.

3.1 Por su aplicación los aerogeneradores se pueden clasificar en:

3.1.1 Aerogeneradores para aplicaciones aisladas.

Son máquinas pequeñas que se utilizan para alimentar cargas que están alejadas de las redes eléctricas convencionales. Típicamente, se combinan con bancos de baterías para almacenar la electricidad que generan y poder acoplar en el tiempo la generación con la demanda. En el mercado actual se ofrecen con una capacidad unitaria inferior a 35 Kw pero se pueden integrar arreglos con varias unidades para suministrar energía eléctrica a cargas mayores. Con frecuencia, este tipo de aerogeneradores se combinan con generadores diesel para proveer una función de respaldo y, dependiendo de las necesidades de suministro de electricidad y de la disponibilidad de los recursos energéticos no convencionales, se pueden combinar también con sistemas fotovoltaicos, microturbinas hidráulicas y otros, dando lugar a combinaciones que se conocen como "sistemas híbridos".

3.1.2 Aerogeneradores para centrales eoloeléctricas.

Son máquinas de tamaño considerable que típicamente se conectan a una red eléctrica convencional para contribuir a la alimentación de cargas específicas de capacidad importante o para construir centrales eoloeléctricas.

Por su apariencia los dos tipos de aerogeneradores son muy similares; sin embargo, en el detalle, existen diferencias técnicas importantes en relación con su diseño y funcionalidad. No obstante, el principio funcional básico es el mismo para ambos. A lo largo del tiempo se han propuesto y probado una gran variedad de conceptos de aerogeneradores. Sin embargo, los de eje horizontal, son los únicos que han alcanzado un grado de madurez aceptable tanto en lo técnico como en lo económico. En estas máquinas, el eje de rotación es paralelo a la dirección del viento.

Como una corriente diferente a este concepto se intentó el desarrollo de sistemas con el eje de rotación en la dirección perpendicular al viento. Este tipo de máquinas, conocidas como máquinas de eje vertical o tipo "Darrieus", no prosperaron significativamente y de hecho, aunque todavía se prueban algunos prototipos, éstas se encuentran fuera del mercado.

Comercialmente existe una amplia variedad de modelos de aerogeneradores de eje horizontal. Algunas de las diferencias entre ellos son:

- ❖ El tipo de subsistemas que se utilizan para la conversión mecánico-eléctrica.
- ❖ Los métodos utilizados para controlar la velocidad de rotación.
- ❖ El número y características de las aspas con que se construye el rotor.
- ❖ El tipo y número de mecanismos de seguridad.
- ❖ Los subsistemas utilizados para incrementar la eficiencia y la confiabilidad de la máquina.
- ❖ Los métodos, elementos y subsistemas que se usan para suavizar la conexión a la red eléctrica y/o mejorar la calidad de la energía generada; en el caso de aerogeneradores para centrales eolieléctricas.
- ❖ Los métodos y elementos que se utilizan para reducir efectos que limitan su aceptación pública.

3.2 Configuración general de los aerogeneradores.

Las partes esenciales con las que cuenta una turbina eólica de eje horizontal se pueden enumerar de la siguiente manera: rotor, eje, caja de engranes, generador, controlador, torre, góndola.

El Rotor puede ser de eje horizontal o vertical, éste recupera, como máximo teórico, el 60% de la energía cinética del flujo de viento que lo acciona. Está constituido por las aspas y el cubo que sujeta a las aspas, el viento incide en las aspas las cuales hacen girar en su conjunto al rotor y por consecuencia gira el eje. Las turbinas del viento modernas de gran escala típicamente se equipan de rotores de tres palas con extensiones de 42 a 80 metros (138 a 262 pies) de diámetro.

El eje es un perfil circular que está conectado a través del rotor por un extremo y por el otro a la caja de engranes.

La caja de engranes permite aumentar las revoluciones que se genera a través del viento hasta revoluciones que permita la generación de energía eléctrica, se habla que las revoluciones en la entrada están entre los 10 – 60 rpm. Aumentando las revoluciones hasta los 1200 – 1800 rpm.

El generador convierte el movimiento rotacional ya sea de las aspas directamente o de la caja de engranes en electricidad. Dentro del generador, embobinados de alambre rotan en un campo magnético para producir la electricidad. Los diferentes diseños de generadores permiten la producción de corriente alterna o directa, encontrándose en un amplio rango de capacidades. La capacidad o el tamaño del generador depende de la longitud de las aspas de la turbina eólica de eje horizontal, debido a que más energía se obtiene si se tiene una mayor área de barrido es decir aspas más largas.

Los controladores son en gran parte importantes dentro de los componentes de una turbina eólica de eje horizontal, debido a que los controladores pondrán en paro o en marcha la generación de energía eléctrica, esto lo realizan con instrumentos que determinan la velocidad del viento (anemómetro) y dirección del viento (veleta). Por medio de los datos que los instrumentos determinen los controladores pondrán en marcha la turbina o en paro, así como ubicar las aspas con la dirección del viento a la cual está sometida. Se ha considerado que los niveles de velocidad en los cuales es recomendado crear energía están entre los 12 – 22 Kph y las aspas se giran en bandera cuando los vientos son mayores a los 60 Kph para evitar cualquier daño por los vientos altos.

La torre en la cual está sustentada la turbina es un perfil tubular, metálico en el cual muchas de las veces es de forma troncocónica, donde la altura de la torre está relacionada con la potencia que se quiere obtener del viento y donde se colocara la turbina.

La góndola es una estructura en la cual se van a conjuntar todos los componentes antes mencionados y está tiene que tener las dimensiones adecuadas para que los componentes de la turbina se conjunten en el mismo lugar.

Además de los componentes antes mencionados, la turbina eólica puede tener componentes extras que permitan un mejor funcionamiento del sistema, por ejemplo mediante equipos que controlen las temperaturas de los componentes los cuales pueden ser mediante intercambiadores de calor o equipos de ventilación.

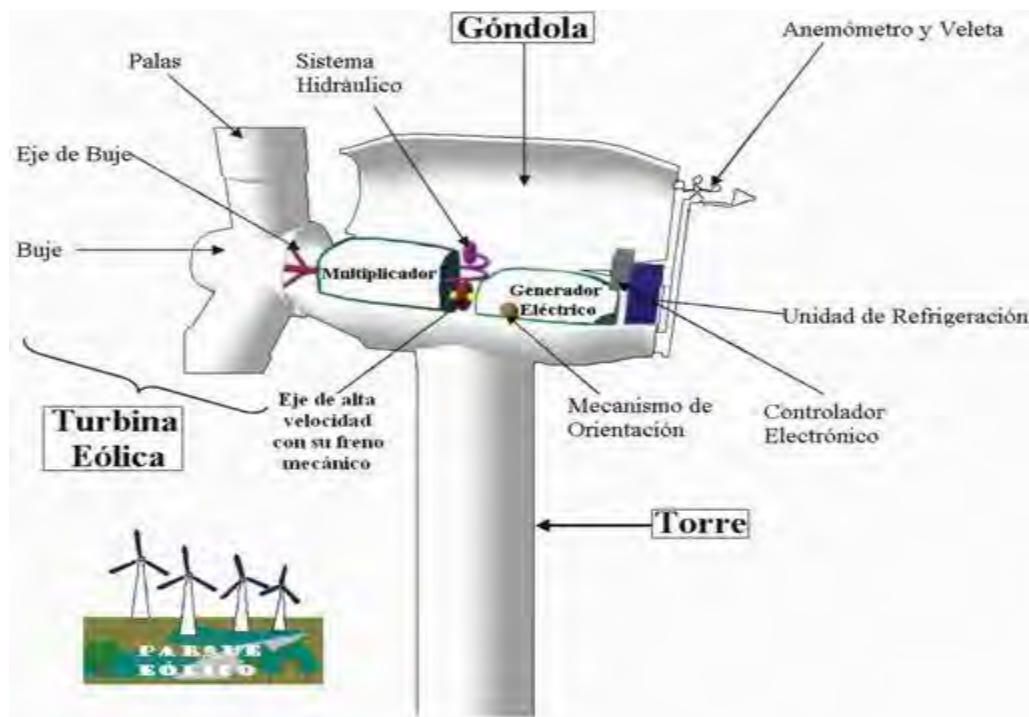


Figura 3.2: Subsistemas principales de un aerogenerador de eje horizontal
Fuente: <http://www.monografias.com>.

Los aerogeneradores de eje horizontal cuentan con un subsistema dedicado a cuidar que el plano del rotor se mantenga en posición perpendicular a la dirección del viento, ya que las desviaciones al respecto reducen la cantidad de energía eólica que éste puede capturar. Los aerogeneradores de potencia media y de gran potencia utilizan sistemas activos basados en servomecanismos, en contraposición a los de pequeña capacidad, los cuales en su mayoría son controlados aerodinámicamente.

Como cualquier sistema electromecánico, un aerogenerador tiene límites operativos que son función de la relación eficiencia-resistencia-costo, la cual está implícita en su diseño. Por lo anterior, se hace necesario limitar su velocidad de rotación y su potencia de salida a niveles que no pongan en riesgo su integridad física. Los métodos empleados para este propósito van desde los diseños pasivos (aspas fijas diseñadas para abatir aerodinámicamente la velocidad angular del rotor a partir de una velocidad del viento específica), hasta el uso de servomecanismos para controlar el ángulo en que el perfil aerodinámico de las aspas se presenta al viento.

Los aerogeneradores de potencia media y de gran potencia cuentan con dos o más subsistemas de seguridad enfocados a minimizar la ocurrencia de fallas que pudieran traducirse en daño a los humanos, así como a salvaguardar la integridad física del equipo.

Todos los aerogeneradores de mediana y gran potencia cuentan con un sistema electrónico propio dedicado al control y a la adquisición de datos (SCADA). El control de los parámetros operacionales de cada aerogenerador se lleva a cabo en el ámbito local de la máquina.

3.2.1 Principio de operación de un sistema conversor de energía

El desempeño de un aerogenerador es siempre representado por su curva de potencia. Este gráfico relaciona la potencia eléctrica que entrega el sistema con la velocidad del viento a la altura del centro de su rotor. La figura 3.2.1 muestra una curva para un aerogenerador de potencia. Las curvas de potencia varían de un modelo de aerogenerador a otro. Estas curvas se utilizan, como un dato de entrada, para estimar la cantidad de energía eléctrica que un aerogenerador específico produciría al operar bajo un régimen de viento dado



Figura 3.2.1: Curva de potencia de un aerogenerador.
Fuente: <http://www.genciencia.com>

La curva de potencia de un aerogenerador se obtiene experimentalmente por pruebas detalladas en condiciones de viento libre (norma IEC 61400-2). Para sistemas de potencia media y de gran potencia, normalmente utilizados en la construcción de centrales eolieléctricas, existen centros de prueba especializados en las pruebas de comportamiento de aerogeneradores, tal como los Laboratorios RISO en Dinamarca.

En estas curvas existen cuatro puntos de referencia cuyos valores trascienden en cuanto a la respuesta operacional de los aerogeneradores. Estos puntos son:

V_i velocidad de inicio de generación (*cut in wind speed*). Velocidad del viento a la cual un aerogenerador empieza a producir energía eléctrica.

V_n velocidad nominal (*rated wind speed*). Velocidad del viento a la cual se alcanza el valor nominal de potencia del generador eléctrico.

V_s velocidad de salida (*cut out wind speed*). Velocidad del viento a la cual un aerogenerador tiene que ejecutar un paro forzado para no operar por arriba de sus límites máximos de diseño.

V_{ss} Velocidad de supervivencia (*survival wind speed*). La velocidad del viento arriba de la cual el rotor de un aerogenerador puede sufrir daños permanentes a pesar de que se encuentre frenado.

3.2.2 Elementos que integran un sistema conversor de energía eólica.

Para transformar la energía eólica en energía mecánica y/o electricidad, un SCEE capta la energía cinética del viento a través de su rotor aerodinámico y la transforma en energía mecánica que concentra sobre su eje de rotación o flecha

principal. Esta energía mecánica comúnmente es acondicionada (valores de torque y velocidad, y/o tipo de movimiento) mediante una caja de engranes (o cualquier otro tipo de transmisión mecánica), antes de transmitirla a la flecha de un generador eléctrico o a una bomba mecánica. La potencia entregada por este tipo de sistemas es proporcional al cubo de la velocidad del viento incidente a la altura del cubo del rotor y está dada por la ecuación:

$$P_R = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_{p(V)} \eta_{mg} \quad \dots\dots (3)$$

Donde:

P_R : es la potencia del sistema.

ρ : es la densidad del aire.

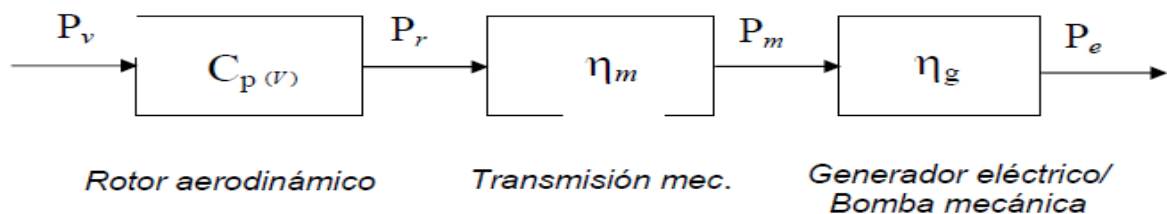
A: es el área de barrida del rotor.

V es la velocidad del viento incidente.

$C_{p(V)}$ es la eficiencia de captación del rotor.

η_{mg} es la eficiencia electro-mecánica del sistema.

Con base en lo anterior, desde el punto de vista de la conversión de la energía, la función global de un SCEE es transformar y acondicionar la energía cinética del viento (captada por su rotor aerodinámico), y ceder ésta como energía mecánica o energía eléctrica para la realización de trabajo útil. Desde este punto de vista, el SCEE está integrado por tres grandes bloques. A continuación se muestra esquemáticamente estos subsistemas, así como las variables de eficiencia que intervienen en el proceso global de conversión.



Proceso de conversión de la energía del viento en energía mecánica y/o eléctrica

Dado lo anterior, la eficiencia global de conversión está dada por la siguiente ecuación:

$$\eta_t = C_{p(v)} \eta_m \eta_g \quad \dots\dots (3.1)$$

Donde:

η_t es la eficiencia total de conversión
 $C_{p(v)}$ es la eficiencia de captación del rotor
 η_m es la eficiencia mecánica de la transmisión
 η_g es la eficiencia del generador
 P_v es la potencia del viento incidente
 P_r es la potencia mecánica en el rotor
 P_m es la potencia mecánica acondicionada
 P_e es la potencia eléctrica entregada

El coeficiente de potencia (C_p) de un rotor eólico varía en función de sus características de operación (par-velocidad) y la geometría específica de sus aspas. Dependiendo de la aplicación para la que está diseñado el SCEE es la conformación de su rotor. Los principios en los que se fundamenta la conversión de la energía del viento en energía mecánica son los mismos para los diferentes tipos de rotores comúnmente utilizados.

En la figura 3.2.2 se muestran las características operacionales de diferentes tipos de rotores y el coeficiente de potencia que puede ser obtenido (con el diseño adecuado) de cada uno de ellos.

En este gráfico se puede notar asimismo los rangos de velocidad de operación para cada tipo y, si consideramos que la potencia mecánica en el rotor es el producto del par torsional por la velocidad de rotación, resulta evidente que la capacidad de par torsional (para la misma potencia) es mayor entre más baja sea la velocidad de rotación.

De ahí que para aplicaciones de bombeo (mecánico) los rotores de baja velocidad son los más adecuados, dado que comúnmente su inicio de operación se da bajo condiciones de carga y la velocidad de operación de las bombas reciprocantes (de pistón) es relativamente baja; pese al bajo coeficiente de potencia que puede ser obtenido.

En el caso de las aplicaciones para generación eléctrica los tipos de rotor más convenientes son los de velocidad alta, dado que en este tipo de aplicaciones el inicio de operación del rotor se da en condiciones de cero carga y, la velocidad de operación de los generadores eléctricos es alta.

Asimismo se pueden obtener coeficientes de potencia mayores y esto, en muchos casos, es altamente significativo en la economía de los proyectos.

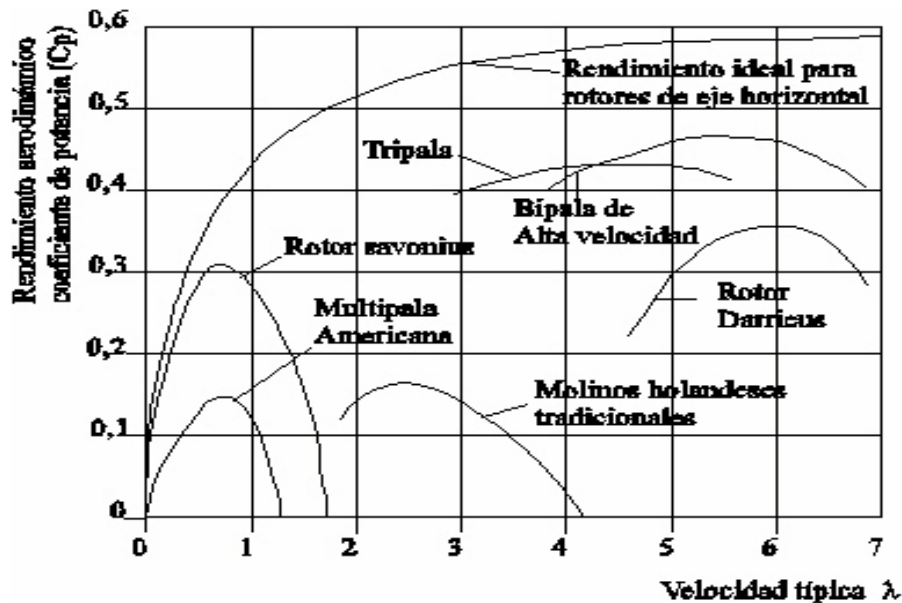


Figura 3.2.2: Coeficiente de potencia y velocidad de operación de diferentes tipos de rotores eólicos.

Fuente: <http://www.tuberrota.wordpress.com>

Con base en estos antecedentes, los conceptos fundamentales sobre la configuración y la operación de los SCEE pueden ser asimilados a partir del análisis de estas máquinas en su modalidad de aerogeneradores. Por otro lado, la tendencia y el desarrollo en general de la tecnología eolieléctrica actualmente se están dando en esta vertiente, independientemente de que el uso último que se dé a la energía sea para bombeo de agua o para generación de electricidad.

3.3 Aplicaciones de la energía del viento.

Los aprovechamientos puntuales de energía eólica, sea en forma de aerobombas aisladas o pequeños aerogeneradores para fines de señalización, telecomunicaciones, protección catódica de oleoductos y gasoductos, uso doméstico o fuerza motriz, etc., son importantes no en términos de la energía aportada, sino en función de su uso final y de significar alternativas viables y económicas.

3.3.1 Bombeo de agua.

Los sistemas de bombeo con energía eólica pueden ser clasificados según los criterios descritos a continuación:

1. Por su capacidad de bombeo expresada por rango de potencia y altura de elevación del agua.
2. Por su proceso de conversión de energía eólica a la específica requerida según el tipo de bomba que se utiliza.
3. Por el grado de sofisticación tecnológica de su diseño, procesos de fabricación y requerimientos de operación.

3.3.1.1. Aerobombas mecánicas

Las aerobombas mecánicas (figura 3.3.1.1) tienen la desventaja que se deben instalar sobre o muy cerca de la fuente de agua. Esto reduce las áreas donde éste tipo de sistemas se pueden utilizar, además de que su única aplicación es el bombeo de agua.



Figura 3.3.1.1: Aspecto general de una aerobomba mecánica.
Fuente: actiweb.es

3.3.1.2. Aerobombas eléctricas

En la figura 3.2.2 Se muestra esquemáticamente un SCEE eléctrico autónomo, en el cual el aerogenerador opera directamente una bomba eléctrica convencional. En este caso la bomba usada es del tipo centrífugo, accionada por un motor eléctrico de inducción (convencional) del tipo jaula de ardilla.

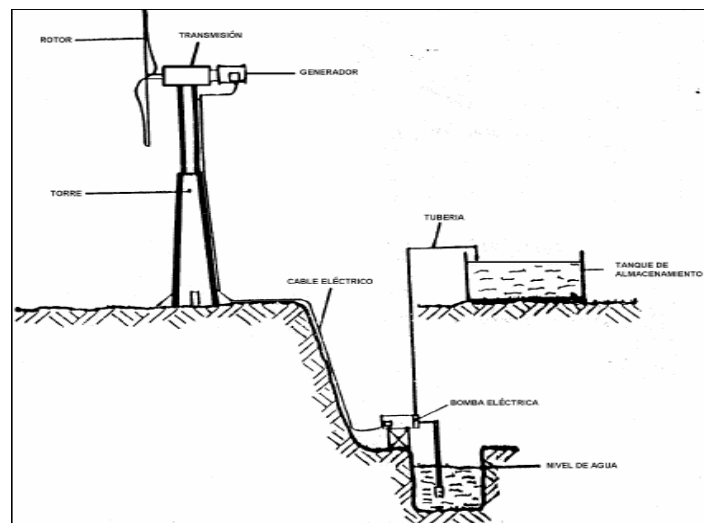


Figura 3.3.1.2: Configuración de un sistema eólico-eléctrico autónomo para bombeo
Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas

Este concepto tiene las siguientes ventajas:

- ❖ El aerogenerador no requiere localizarse sobre la fuente del agua. Lo que permite optimizar la localización del aerogenerador y la bomba de agua.
- ❖ Motores y equipo de bombeo estándar pueden ser utilizados, con las ventajas logísticas que esto implica: repuestos, servicios de mantenimiento, menor costo, etc.

3.3.2 Generación eléctrica

Un aerogenerador capta la energía cinética del viento a través de su rotor aerodinámico y la transforma en energía mecánica que concentra sobre su eje de rotación o flecha principal. Esta energía mecánica comúnmente es acondicionada mediante una caja de engranes (valores de torque y velocidad), antes de transmitirla a la flecha de un generador eléctrico para la producción de electricidad.

La figura 3.3.2 muestra el aspecto típico de un aerogenerador de eje horizontal de pequeña capacidad.



*Figura 3.3.2: Aspecto general de un aerogenerador de pequeña capacidad.
Fuente: energiadiario.com*

Los aerogeneradores de gran potencia cuentan con dos o más subsistemas de seguridad enfocados a minimizar la ocurrencia de fallas que pudieran traducirse en daño a las personas y/o al propio equipo.

3.3.2.1 Sistemas autónomos

Los sistemas autónomos pueden tener tres configuraciones:

1. Aerogenerador/ carga
2. Aerogenerador/ sistema de almacenamiento/ carga
3. Aerogenerador/ sistema de respaldo/ carga

En la primera configuración la energía eléctrica generada se aplica directamente a una carga, en este esquema lo significativo es el efecto acumulado. La demanda puede ser a través de una carga resistiva para proporcionar calefacción industrial o para procesos, o utilizar la energía en hidrólisis de agua para producir hidrógeno o cualquier otra reacción electroquímica, así como en protección catódica a gasoductos y oleoductos, entre otras.

La segunda configuración constituye la aplicación clásica del banco de baterías, a través de éste se almacena energía mientras la demanda (carga) es baja, y es cedida al sistema cuando la demanda es alta y/o la generación es deficiente o nula.

En la tercera configuración, el aerogenerador es utilizado en conjunto con otra fuente autónoma de energía, que puede ser de tipo no convencional o convencional. Este tipo de configuración tiene por objeto compensar las “desventajas” de cada uno de los sistemas utilizados, aumentar la confiabilidad y disponibilidad de energía del conjunto, así como reducir costos totales. Este es el caso de un aerogenerador acoplado a un motogenerador diesel, cuyo régimen de trabajo y consumo de combustible estarán en función inversa de la disponibilidad de energía eólica, reflejándose esto en mayor vida útil para la máquina de combustión interna y menos consumo de combustible.

3.3.2.2 Sistemas interconectados

En general, los sistemas interconectados a la red eléctrica tienen el objeto de aportar energía a ésta, implicando en ello un ahorro de otros energéticos. Para máquinas de pequeña y mediana capacidad, acopladas a la red eléctrica, el generador de inducción se considera la mejor opción. Para casos de aerogeneradores mayores que 1 MW, interconectados a la red, en forma individual o en conjuntos; el generador síncrono es la alternativa aparentemente más adecuada.

Tratándose de máquinas de pequeña y mediana capacidad según el esquema de generación de velocidad variable-frecuencia constante, este acoplamiento puede hacerse a través de rectificación y una posterior inversión síncrona.

Visto desde esta perspectiva, se puede decir que el acoplamiento de un SCEE a una red eléctrica, es directa cuando se utilizan generadores de inducción en máquinas de velocidad constante-frecuencia constante, e indirecta cuando en máquinas de velocidad variable-frecuencia variable que utilizan generadores síncronos el enlace se realiza mediante rectificación-inversión síncrona.

3.3.2.3 Sistemas híbridos

Un sistema híbrido en su conjunto está integrado por dos o más tecnologías diferentes (solar, eólica, biomasa, microhidráulica, etc.). El objetivo final en una configuración de este tipo es satisfacer los requerimientos energéticos de la aplicación a un costo competitivo, aprovechando los recursos disponibles en la región.

La aplicación de los sistemas híbridos data de los años 90's y es el resultado del desarrollo de una tecnología que puede ser utilizada para el aprovechamiento de todos los recursos energéticos disponibles en la región, combinando las ventajas inherentes a cada uno de los subsistemas y/o tecnologías seleccionados.

Actualmente este tipo de tecnología se utiliza en más de 20 países y su principal nicho de aplicación es en comunidades rurales, pequeñas islas, etc. En general, en proyectos de electrificación donde por la magnitud de la demanda y/o la lejanía a los centros de población urbana, resulta económicamente inviable el uso de las energías convencionales para satisfacer la demanda energética.

En la figura 3.3.2.3 se muestra el aspecto general de una instalación híbrida solar eólica en una aplicación de electrificación rural.



Figura 3.3.2.3: Aspecto típico de un sistema híbrido solar-eólico en un área rural

Fuente: [http/ www. cubasolar.cu](http://www.cubasolar.cu)

3.4 Instalación.

Una instalación eólica a gran escala, llamada granja eólica o parque eólico, consiste en una colección de estas turbinas.

La distribución de las turbinas eólicas en un parque eólico es un paso importante, aunque existen muchas consideraciones para que un parque pueda funcionar con mayor eficiencia, esto debido a que se presentan varios fenómenos alrededor de una turbina.

Entre los fenómenos se encuentra el de apantallamiento es decir tras el paso de el viento dominante por una turbina este genera en el viento turbulencia el cual puede recorrer gran distancia hasta que se regule, este fenómeno también se le conoce como efecto de estela, si el viento llega con turbulencia a la turbina contigua este no generara la potencia adecuada al viento prevaleciente debido a que el ángulo de ataque cambiara y esto se puede presentar a la turbina siguiente y así

sucesivamente, también las cargas dinámicas que se generan por este fenómeno provocarán que la fatiga sea más rápida para los componentes de la turbina.

Lo mismo pasa con las turbinas que se encuentren lateralmente. La potencia que puede otorgar el parque eólico, varía con respecto a la distribución de las turbinas. Un punto importante de considerar es la dirección de viento que se presenta con mayor frecuencia durante el año, ya que la colocación de las turbinas será con respecto al viento dominante y posteriormente si estas cuentan con sistema de localización y de posicionamiento rotaran a la dirección adecuada.

Estudios desarrollados para la localización de turbinas eólicas para parques, llegaron a la conclusión a que la distribución adecuada para terrenos planos donde no existan obstáculos que limiten el funcionamiento de las turbinas eólicas, es de una distancia de 10 a 12 diámetros en dirección del viento dominante. Este estudio se enfocó a determinar la pérdida de energía variando la separación de los aerogeneradores en la dirección perpendicular al viento dominante.

En la actualidad existen programas de cómputo que dicen ser la solución para la distribución de las turbinas, aunque mucha de la literatura especializada sugiere que estos modelos están en etapa de validación mencionando algunas limitaciones. En la práctica, el diseño de parques eoloeléctricos en terrenos planos sin obstáculos, se simplifica mediante estudios de efectos de estela o fenómeno de apantallamiento. Algunos diseñadores optan por una distribución reticular separando las turbinas eólicas hasta 5 diámetros en la línea perpendicular a la dirección del viento dominante (Figura 3.4) y 10 diámetros en la dirección del viento dominante (Figura 3.4.1).



Figura 3.4: Distancia lateral entre turbinas 5 D imagen de la Venta Oaxaca.
Fuente: www.cfe.gob.mx



*Figura 3.4.1.: Distancia de frente entre turbinas 10 D imagen de la Venta Oaxaca.
Fuente: www.cfe.gob.mx*

En terrenos complejos el problema adquiere dimensiones más complejas, en terrenos complejos, la distribución de aerogeneradores para construir parques eólicos tiene implicaciones muy relevantes. El flujo eólico que incide sobre un terreno complejo se ve modificado significativamente por la topografía de la zona. Mientras algunos sitios se ven favorecidos por la aceleración del viento, en otros casos sucede lo contrario.

En el ambiente comercial, hay quienes prefieren reducir las distancias entre turbinas para obtener un menor costo de inversión. Esto puede ser negativo al mediano y largo plazo ya que los efectos de fatiga por la turbulencia adicional, puede manifestarse después de que el periodo de garantía haya expirado en las máquinas. Con lo que respecta a la inversión, el gasto puede aumentar considerablemente por los elementos de la central como lo son las líneas de recolección, caminos de acceso, líneas de comunicación de datos, se hacen mayores y también se incrementa el costo de la renta o compra del terreno. Además de desaprovechar parte del recurso eólico disponible en un área determinada. De ahí la importancia que conlleva la adecuada instalación de las turbinas eólicas en un parque

3.5 Localización

Las estimaciones exactas de la velocidad del viento son críticas al momento de evaluar el potencial de la energía eólica en cualquier localización.

Los recursos eólicos son caracterizados por una escala de clases de viento según su velocidad (Tabla 3.5), que se extiende de la clase 1 (la más bajo) a la clase 7 (la más alta).

Los desniveles de la superficie a través de la cual sopla el viento antes de llegar a una turbina determina la cantidad de turbulencia que ésta turbina experimentará.

Los vientos turbulentos ejercen mayores tensiones sobre el rotor y se elevan, reduciendo consecuentemente la expectativa de vida de la turbina. Así, la mayoría de granjas del viento están ubicadas en localizaciones rurales, lejos de edificios, de árboles y de otros obstáculos.

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

Tabla 3.5.: Clases de vientos.

Fuente: www.cfe.gob.mx

Mientras que las características técnicas del viento en una localización específica son muy importantes, muchos otros factores también contribuyen en la decisión del emplazamiento. Una localización alejada de la red de distribución eléctrica puede llegar a ser poco rentable, pues se requerirán nuevas líneas de transmisión para conectar la granja eólica con la red. La infraestructura de transmisión existente puede llegar a necesitar una ampliación para poder manejar la fuente de energía adicional. Las condiciones del suelo y del terreno deben ser convenientes para la construcción de las fundaciones de las torres. Finalmente, la elección de una localización puede estar limitada por regulaciones sobre el uso de la tierra y la capacidad de obtener los permisos requeridos de las autoridades locales, regionales y nacionales.

CAPITULO 4

4. Metodología de Evaluación del recurso Eólico (caso de la Rumorosa, Baja California, México).

4.1 Obtención de datos.

4.2. Determinación de la velocidad y dirección del viento en la Estación BCo7.

4.3 Extrapolación a 50 metros de altura.

4.4 Duración del viento.

4.5 Curva de generación de potencia mecánica.

4.6 Conclusiones

4.- METODOLOGIA DE EVALUACION DEL RECURSO EOLICO (CASO DE LA RUMOROSA, BAJA CALIFORNIA, MEXICO).

4.1 Obtención de datos

El servicio meteorológico nacional es el organismo que se encarga de proporcionar información sobre el estado del tiempo que prevalece o afecta a nuestro territorio. El SMN depende directamente de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que a su vez forma parte de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Entre sus funciones podemos citar algunas como son:

- Mantener informado a Protección Civil sobre posibles amenazas meteorológicas.
- Concientizar a la población sobre cómo protegerse y por ende evitar peligro.
- Proporcionar información meteorológica a la población en general.
- Realizar estudios sobre las condiciones atmosféricas.
- Clasificar información y capturarla en el Banco Nacional de Datos Climatológicos para consulta de la población.

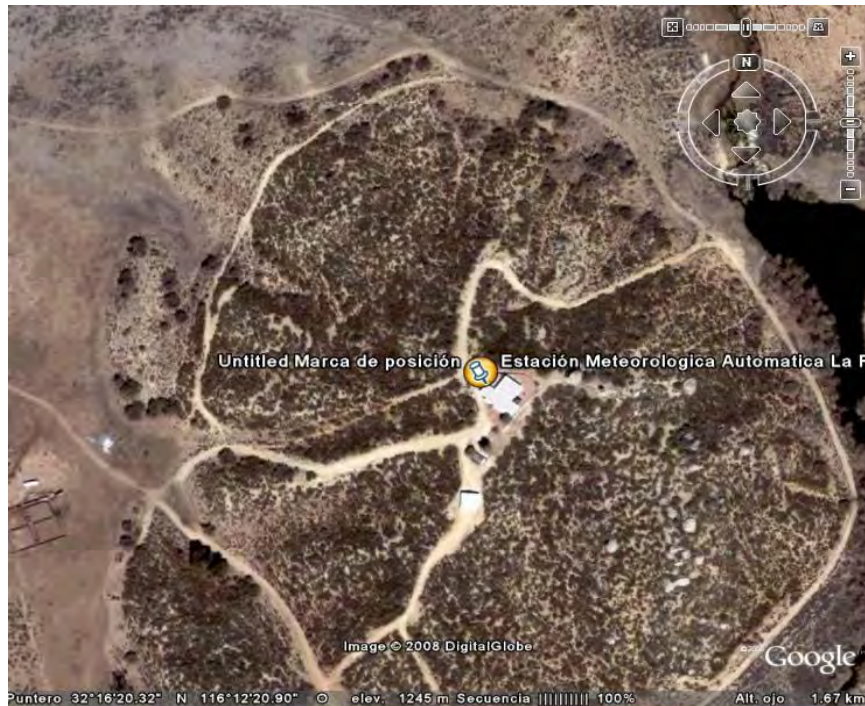


Figura 4: Ubicación de la estación meteorológica de La Rumorosa, Baja California.

Fuente: [http/ www. Google Earth.](http://www.GoogleEarth)

Nuestro punto de partida para realizar una evaluación del recurso eólico en cualquier región del país es la recolección de los datos estadísticos como son: dirección del viento, dirección del viento más alto, velocidad del viento, temperatura promedio del aire, humedad relativa, densidad de flujo de energía de radiación solar entre otras, debido a que la toma de información de estos datos es cada 10 minutos con un equipo estandarizado y que cumple con las normas que regulan y ajustan el funcionamiento de equipos de medición del viento para la estación meteorológica automática (Tabla 4). En promedio por cada mes obtenemos alrededor de 4400 datos por tal motivo sólo se muestra una parte de éstas.

Date	Time	Dir deg	WSMDir deg	WSK kph	WSMK kph	AvgTemp C	AvgRh %	AvgBP mbar	Rain mm	AvgSR W/m ²
2008 Ene 01	00:00	49	54	30.4	51.7	10	27	879.5	0	149
2008 Ene 01	00:10	53	45	20.4	36.7	9.4	29	879.6	0	54
2008 Ene 01	00:20	54	39	17.8	47.7	8.7	30	879.6	0	18
2008 Ene 01	00:30	48	63	27.9	46.5	8.3	32	879.5	0	14
2008 Ene 01	00:40	42	39	18.9	45.9	7.9	33	879.6	0	9
2008 Ene 01	00:50	47	33	24.3	49.4	7.6	34	879.6	0	3
2008 Ene 01	01:00	42	46	26.3	43.6	7.2	35	879.7	0	-1
2008 Ene 01	01:10	41	44	26	48.3	6.9	36	879.8	0	-3
2008 Ene 01	01:20	43	42	30.2	47.1	6.8	36	879.8	0	-3
2008 Ene 01	01:30	40	36	31.3	49.4	6.8	36	879.9	0	-3
2008 Ene 01	01:40	43	43	32.7	48.3	6.8	36	880.1	0	-3
2008 Ene 01	01:50	43	39	32.6	48.8	6.6	36	880.2	0	-3
2008 Ene 01	02:00	43	44	37.4	56.3	6.6	36	880.1	0	-3
2008 Ene 01	02:10	39	40	41.7	55.7	6.5	37	880.1	0	-3
2008 Ene 01	02:20	41	47	37	50	6.2	38	880.2	0	-3
2008 Ene 01	02:30	40	51	39.2	60.3	6.1	39	880.3	0	-3
2008 Ene 01	02:40	41	50	38.4	54.6	6.1	40	880.5	0	-3
2008 Ene 01	02:50	43	36	34.7	52.3	6	40	880.6	0	-3

*Tabla 4: Variables que se registran en la EMA
Fuente: Servicio Meteorológico Nacional.*

4.2. Determinación de la velocidad y dirección del viento en la estación BC07

En base a datos estadísticos proporcionados por la estación meteorológica automática BC07 durante el transcurso de los años 2008,2009 y 2010 se realizó una evaluación por medio de un programa de computación de visual Basic el cual lleva a cabo un conteo y nos arroja un resultado de la frecuencia de las velocidades que se presenta, éste puede ser para un día, un mes, un año, etc.

Para el presente trabajo se agruparon los datos estadísticos de 2 meses, de acuerdo al espectro de energía de viento del viento, la velocidad promedio del viento medida en un periodo de 10 minutos se ha considerado como la velocidad estacionaria, además de que al agrupar los datos en periodos bimestrales nos permite observar, estimar y analizar los patrones de comportamiento del viento. La altura a la cual se realizó esta medición es de 10 metros.

Los resultados obtenidos de esta evaluación nos permitieron elaborar gráficos bimestrales de los años 2008,2009 y 2010 en los cuales observamos el comportamiento del viento. En el anexo “A” se muestran la totalidad de ellas.

También se pudo obtener por parte del Servicio meteorológico la a dirección predominante del viento, durante el transcurso de los años 2008, 2009, 2010 la cual es de Este-sureste con una incidencia durante el año del 31.44%. También el viento tiene una componente importante en la dirección sur, ya sea como sureste, o suroeste, etc., y todos estos componentes representan el 65.63% del total de los años 2008, 2009 y 2010.

Como se puede observar en la figura 4.1 que representa el porcentaje de las direcciones predominantes.

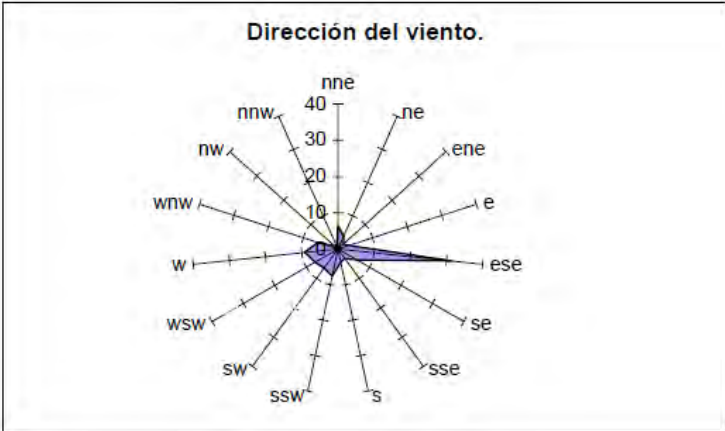
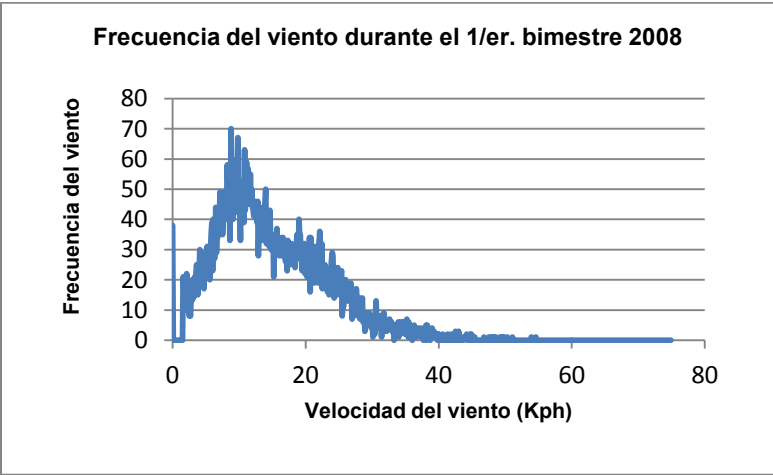
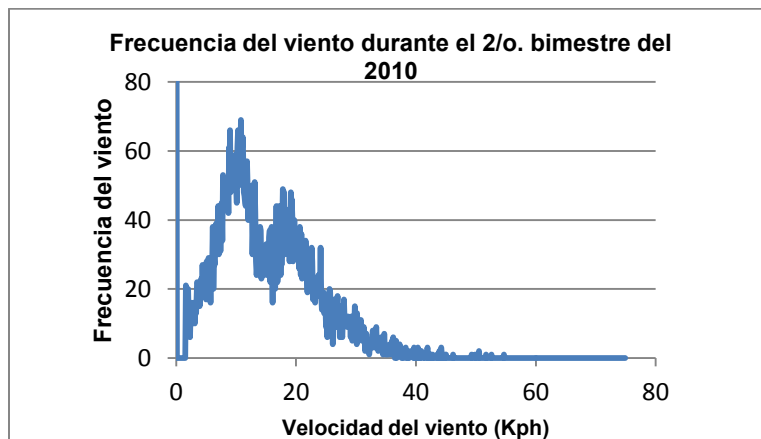
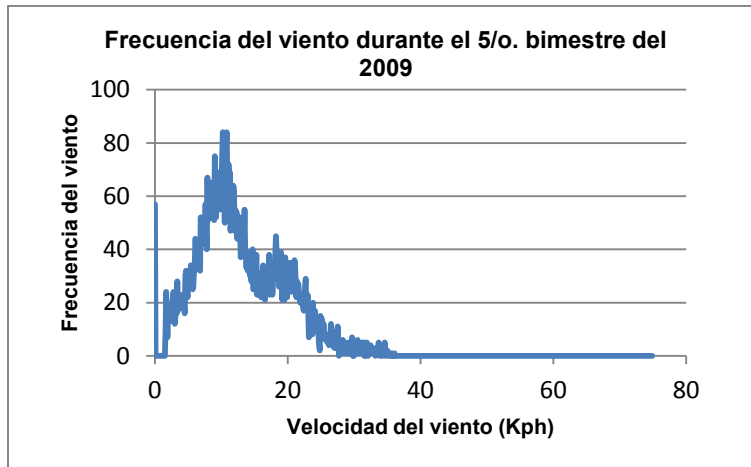


Figura 4.1: Distribución de dirección de viento preferencial, de acuerdo con los datos del 2008, 2009, 2010.

Fuente: www.smn.cna.gob.mx

A continuación se muestran algunos ejemplos en forma aleatoria de las graficas bimestrales obtenidas para observar su comportamiento.

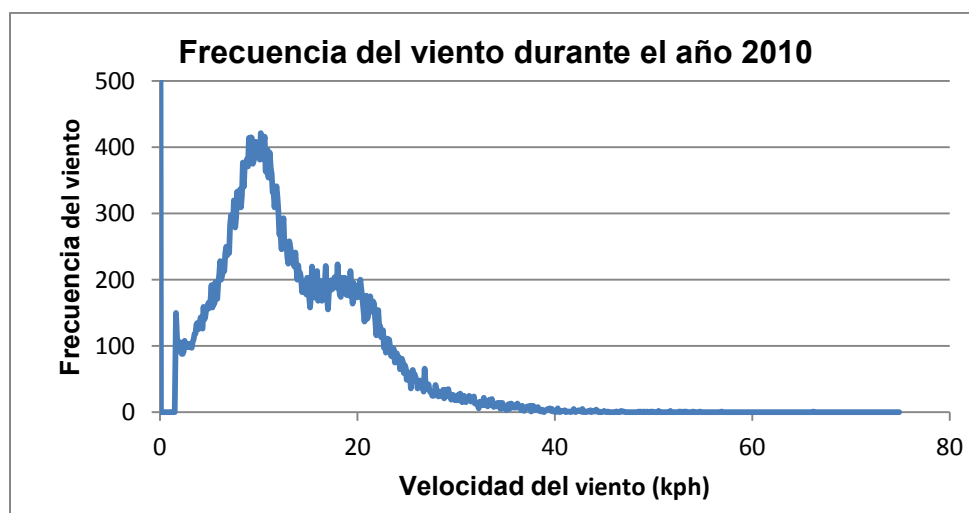
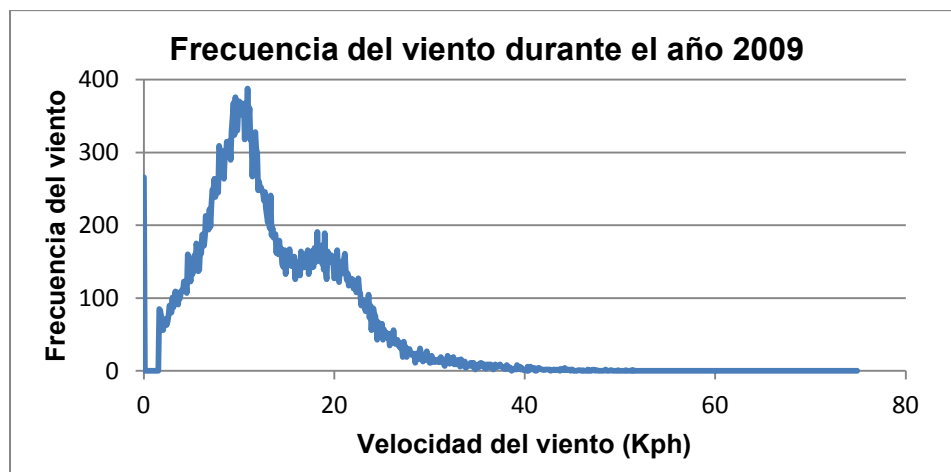
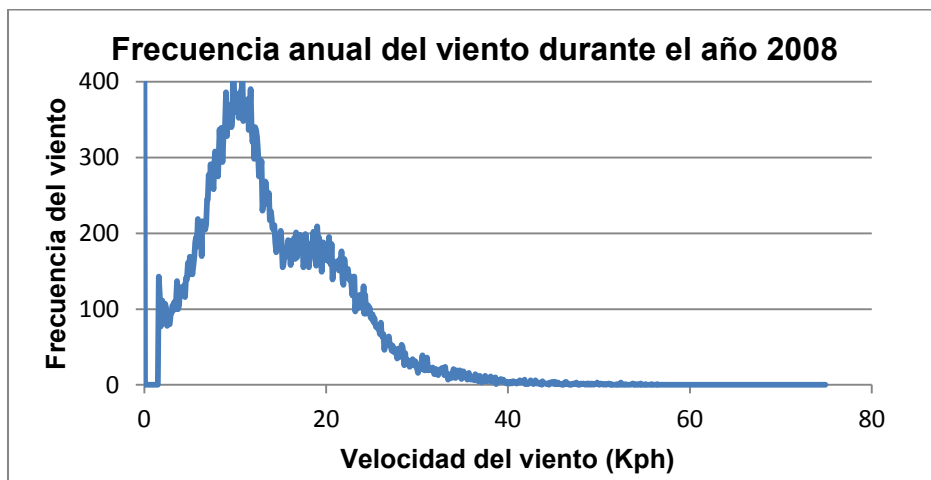




Al obtener la totalidad de las graficas bimestrales podemos observar un patrón de comportamiento muy similar para la totalidad de ellas en cada año, así mismo se puede agrupar los datos de forma anual y realizar su análisis para obtener una velocidad media anual.

Esto no es más que sumar la totalidad de frecuencia de veces que se presenta una velocidad en un año y al igual que en el proceso anterior graficamos velocidad y frecuencia para poder analizar el comportamiento anual de la velocidad del viento, una vez que se ha llevado a cabo este paso obtuvimos como velocidad media un resultado de 3.32 m/s o 11.94 Kph

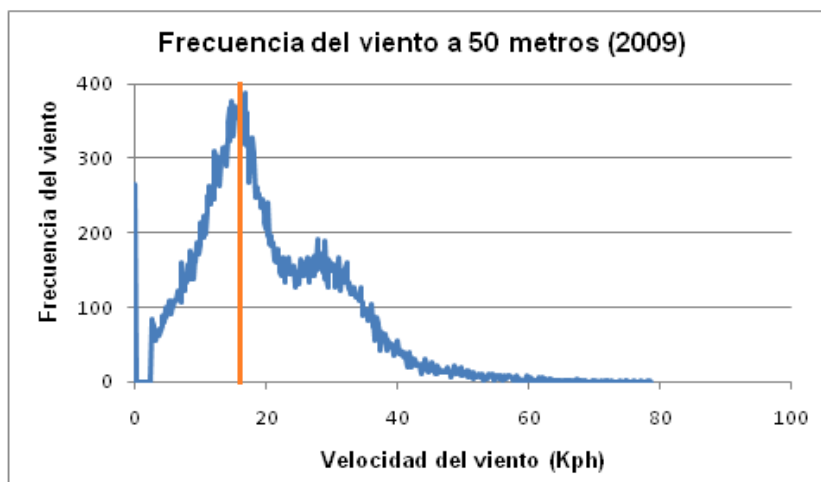
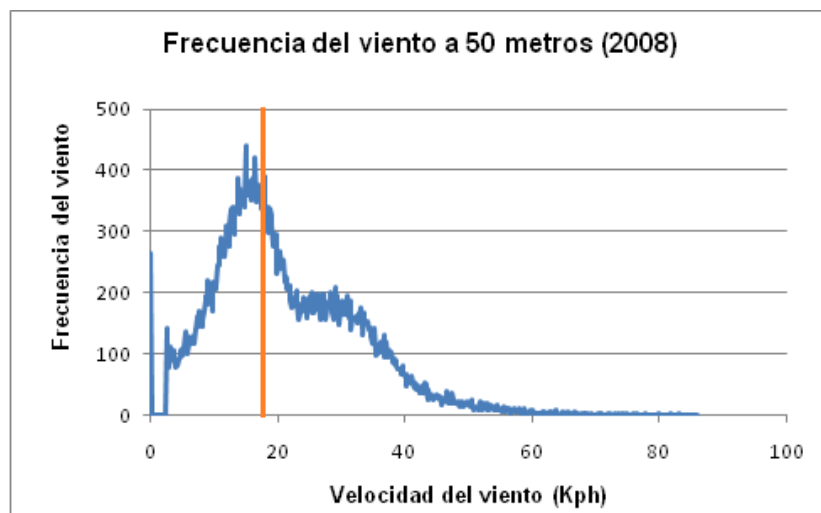
Los resultados de las graficas obtenidas son las siguientes:

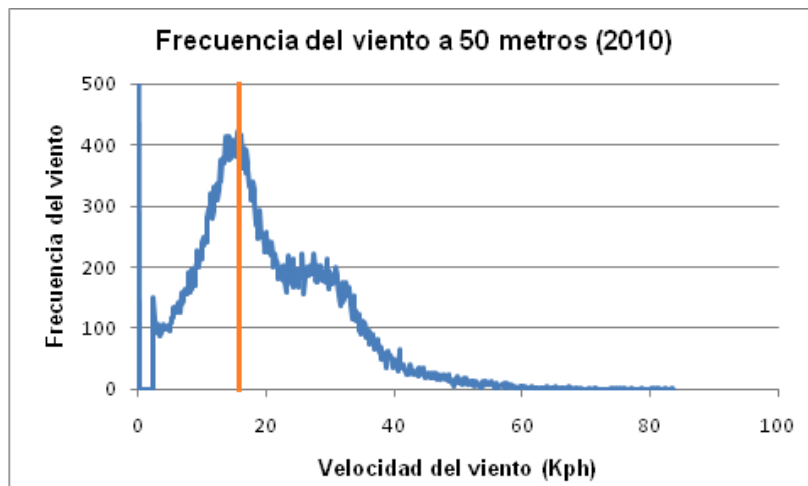


4.3 Extrapolación a 50 metros de altura.

Los gráficos obtenidos anteriormente se realizaron para una altura de 10 metros pero para un planteamiento de una altura de 50 metros se requiere de hacer una extrapolación de las alturas, esto se llevo a cabo mediante la relación 2.14 la cual se requiere un valor de α para cada valor de velocidad, mediante la ecuación 2.15, en la cual se obtuvieron los gráficos extrapolados a una altura de 50 metros, en el anexo "B" se muestran las cálculos de estas formulas y su desarrollo.

Como resultado de la extrapolación tenemos que nuestra velocidad promedio anual seria de 5.0 m/s aproximadamente, es decir 18.00 Kph, si bien esta velocidad podría ser nuestro punto de partida para seleccionar el aerogenerador, no podemos olvidar que el determinar la densidad de potencia del viento es un punto muy importante y más adelante la determinaremos para conocer que tan factible es utilizar el recurso eólico en esta región.





4.4 Duración del viento.

La determinación de la duración del viento es un elemento característico de gran importancia en los aerogeneradores eléctricos para determinar la energía eléctrica generada a lo largo del tiempo y con esto evaluar también el factor de planta.

Con base en los resultados obtenidos en las secciones anteriores se presentan los gráficos para los años 2008, 2009 y 2010, respectivamente.

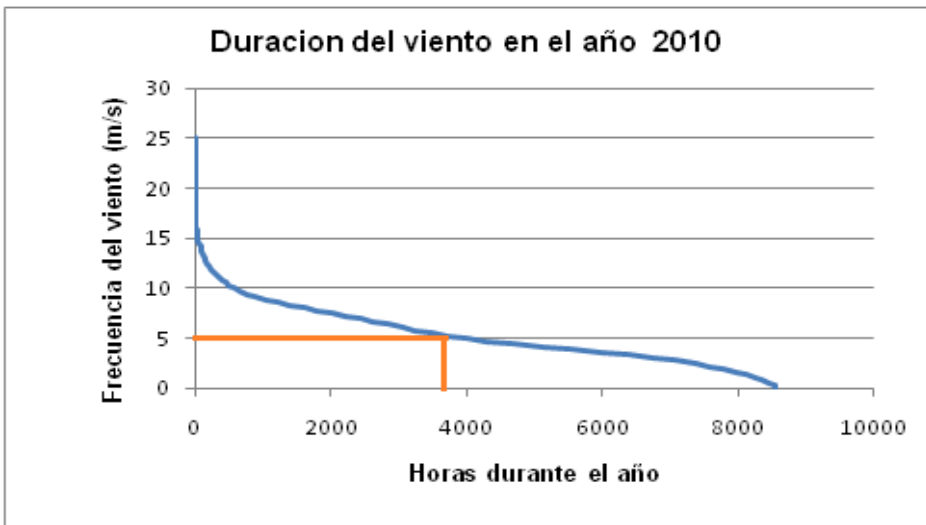
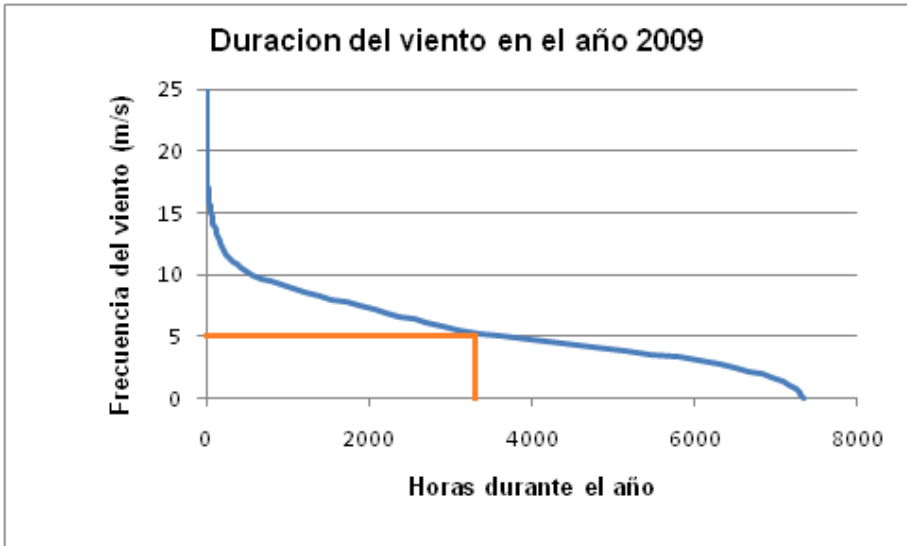
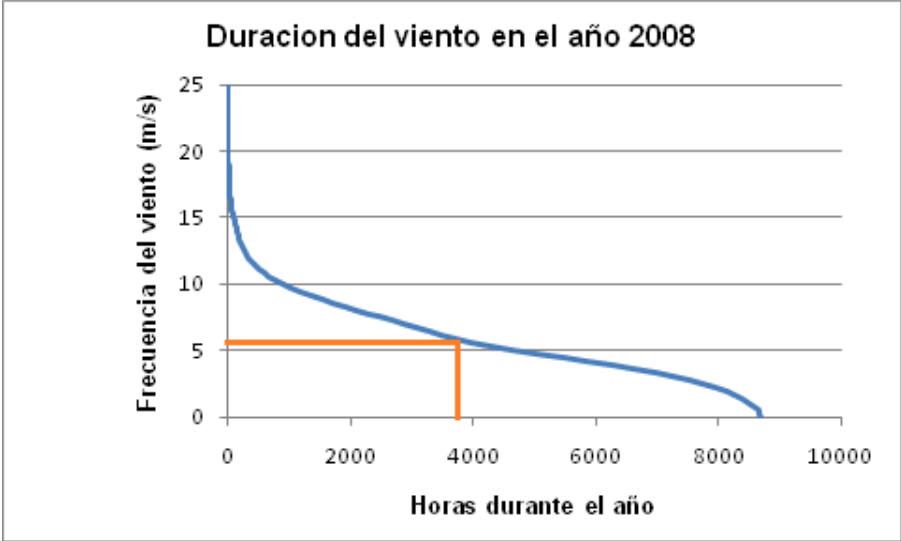
El procedimiento para obtener estos gráficos es sencillo, solo se van sumando las horas acumuladas correspondientes a un intervalo de velocidad establecido en todo el rango de velocidades de la base de datos de viento y evaluados a 50 metros de altura.

La curva de duración del viento determina el tiempo en el cual se presentará un viento determinado o mayor a este, durante el transcurso del año.

En este caso, como podemos observar para el viento promedio obtenido de 5.00 m/s que se presenta durante los años 2008, 2009 y 2010 el tiempo de duración es aproximadamente de 3766.8 horas al año.

Este parámetro ayuda a determinar cuál es el posible factor de planta, es decir durante cuánto tiempo aproximadamente se podrá obtener potencia eolieléctrica a cierta velocidad.

Esto nos da una idea de que tan apropiada o no resulta la instalación de un aerogenerador en la zona, ya que este dato refleja que velocidades de viento se pueden disponer en la región y cuánto tiempo durante el transcurso del año se presentan u otras velocidades mayores a las citadas.



El factor de planta que se puede obtener, es de aproximadamente 0.43, mediante la consideración de que el 43% del total del tiempo se obtendrán valores de velocidades mayores o iguales a 5.0 m/s.

También es de mención señalar que los datos que nos fueron otorgados por el servicio meteorológico nacional, nos garantizan un radio de 3 Km. en los cuales se presentan dichas velocidades, a partir de esta distancia los datos pueden tener cierto porcentaje de error, pero aun con esto podemos considerar esta zona con un potencial eólico factible de ser utilizado.

4.5 Curva de generación de potencia mecánica.

Al igual que la curva de duración de viento, la curva de generación de potencia mecánica por unidad de área, su importancia radica en la representación de cuál es la generación de potencia mecánica con respecto a la frecuencia de velocidades de viento correspondiente.

El modo con el cual se obtiene esta curva es sencillo, es obtener la potencia mecánica por unidad de área que se genera a partir de la evaluación de las repeticiones de viento que corresponde a la velocidad que se desarrolla en la zona mencionada.

La ecuación con la cual nos apoyaremos para determinar la potencia mecánica por unidad de área generada por el viento, viene dada de la siguiente relación:

$$IP = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} C_p \rho V^3 \quad \dots\dots (4.1)$$

Donde:

C_p. corresponde a la relación 2.21 de 0.593

Se ocupa esta relación de viento ya que a esta velocidad se considera la máxima eficiencia que se le puede extraer del viento.

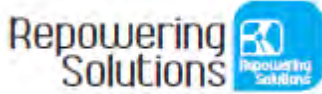
Se hace la consideración adicional en el sentido de que la temperatura promedio anual en la estación BCO7 en los años 2008,2009 y 2010 fue de 13.78°C, teniendo una altitud de 1262 metros, así mediante la relación 2.17 se estimo una densidad promedio del aire en la zona de 1.059 Kg./m³.

El resultado que obtenemos de la ecuación anterior sustituyendo los valores obtenidos nos entrega un resultado de 39.25 W/m².

En la actualidad existen empresas que se dedican al diseño y fabricación de turbinas eólicas dentro de las cuales se puede nombrar a la empresa española Gamesa, a la danesa Vestas, a la alemana Siemens o Mitsubishi por nombrar solo

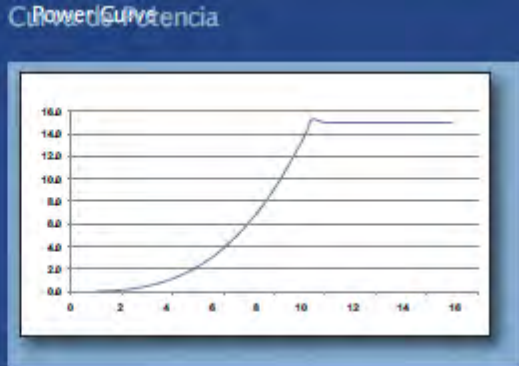
algunas, cabe también señalar el notable desarrollo tecnológico que ha surgido en cuanto a aerogeneradores.

A continuación haremos mención de algunos aerogeneradores, así como sus características técnicas y que podrían en un momento determinado ser utilizados para la explotación del recurso en la región evaluada.



Especificaciones técnicas **IPOWER 15KW**

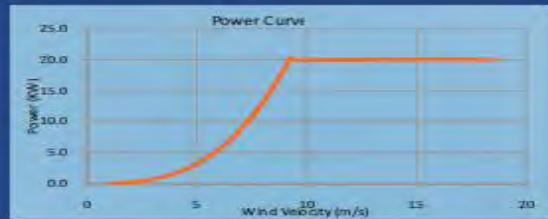
Potencia	15kW @ 10 m/s
Producción anual	Aproximadamente 28.870kW @ Velocidad media de 4,5 m/s Aproximadamente 36.423kW @ Velocidad media de 5 m/s Aproximadamente 43.657kW @ Velocidad media de 5,5 m/s Aproximadamente 50.144kW @ Velocidad media de 6 m/s Aproximadamente 55.608kW @ Velocidad media de 6,5 m/s Aproximadamente 59.919kW @ Velocidad media de 7 m/s Aproximadamente 65.158kW @ Velocidad media de 8 m/s
Velocidad para arranque	1,7 m/s
Velocidad para corte	25 m/s
Velocidad nominal	10 m/s
Díámetro Rotor	10 m
Altura torre	15 m
Anual ahorro de Co2	19-23 ton



Especificaciones técnicas **IPOWER 20KW**

Potencia	20kW @ 9 m/s
Producción anual	Aproximadamente 38.460kW @ Velocidad media de 4,5 m/s Aproximadamente 48.700kW @ Velocidad media de 5 m/s Aproximadamente 58.700kW @ Velocidad media de 5,5 m/s Aproximadamente 67.942kW @ Velocidad media de 6 m/s Aproximadamente 76.049kW @ Velocidad media de 6,5 m/s Aproximadamente 82.760kW @ Velocidad media de 7 m/s Aproximadamente 91.993kW @ Velocidad media de 8 m/s
Velocidad para arranque	1,7 m/s
Velocidad para corte	25 m/s
Velocidad nominal	9 m/s
Diámetro Rotor	13 m
Altura torre	15-20 m
Anual ahorro de Co2	26-30 ton

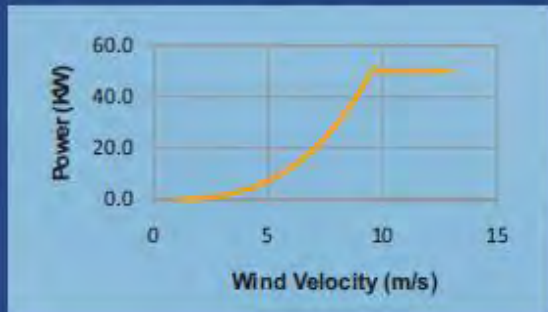
Power Curve



Especificaciones técnicas **IPOWER 50KW**

Potencia	50kW @ 9,5 m/s
Producción anual	Aproximadamente 77.029kW @ Velocidad media de 4,5 m/s Aproximadamente 99.641kW @ Velocidad media de 5 m/s Aproximadamente 122.591kW @ Velocidad media de 5,5 m/s Aproximadamente 144.521kW @ Velocidad media de 6 m/s Aproximadamente 164.339kW @ Velocidad media de 6,5 m/s Aproximadamente 181.311kW @ Velocidad media de 7 m/s Aproximadamente 198.579kW @ Velocidad media de 8 m/s
Velocidad para arranque	1,7 m/s
Velocidad para corte	25 m/s
Velocidad nominal	9 m/s
Diámetro Rotor	18 m
Altura torre	30 m
Anual ahorro de Co2	70-80 ton

Power Curve



Estos son solo algunos de tantos aerogeneradores que pudiesen ser utilizados ya que como comentamos anteriormente el desarrollo de tecnología eólica ha crecido a pasos agigantados y tomando en cuenta que nuestra extrapolación se realizó a 50 metros, seguramente si se realizara a mayor altura encontraríamos un potencial eólico mucho mayor y por ende podríamos utilizar aerogeneradores de mucha mayor potencia e incluso instalar un parque eólico que nos proporcionara una gran cantidad de energía, claro que para esto se necesitara investigación e implementación de softwares tecnológicos mucho más avanzados y de un mayor presupuesto en la investigación.

4.6 CONCLUSIONES

El desarrollo sostenible del país implica además de la explotación racional de los recursos locales de una región, la búsqueda de alternativas para lograr una mejora en la calidad de vida para las personas, si bien es cierto que el logro de la sostenibilidad energética, no se puede concentrar en la explotación de una sola fuente de energía es necesario aprovechar las diferentes fuentes de energía renovables con las que contamos en nuestro planeta.

La energía eólica ha dejado de ser una "nueva" fuente de energía y gracias a la investigación en curso y los avances tecnológicos, puede ofrecer productos que compiten con fuentes de energía más convencionales, como el petróleo y el gas.

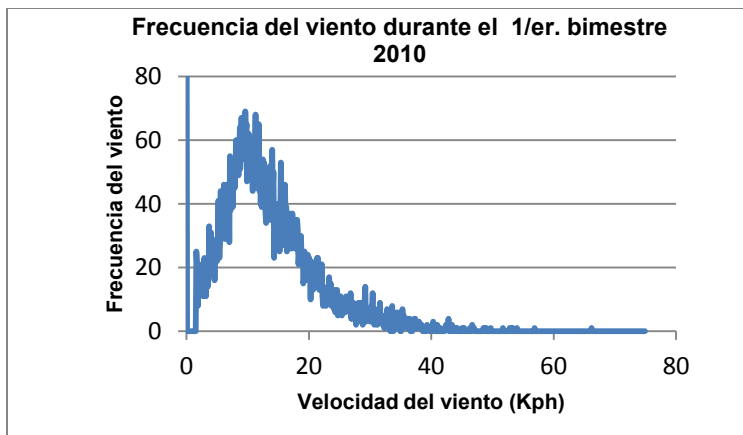
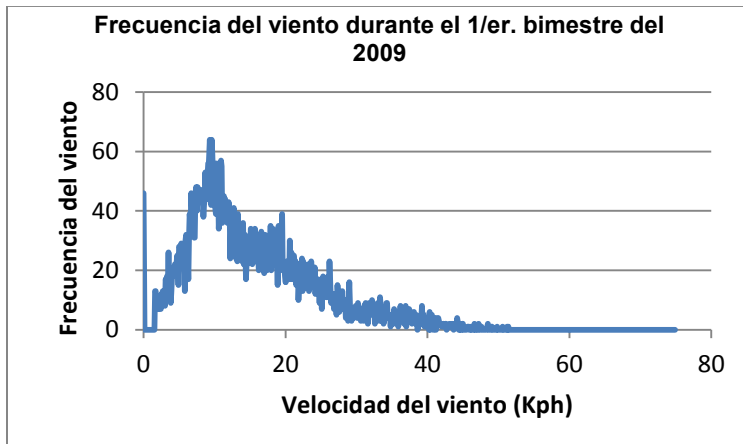
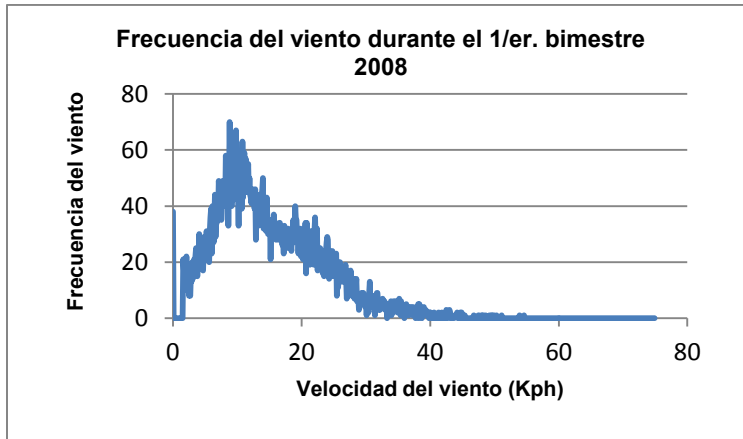
Cabe señalar que en el estudio del recurso eólico en la región de la Rumorosa Baja California, México se obtuvo una velocidad media promedio de 5 m/s y un tiempo de duración de aproximadamente 3766.8 horas en promedio al año, con estos resultados podemos señalar que es muy factible utilizar aerogeneradores en esta región para el aprovechamiento del recurso y no solo enfocarlo al suministro de energía eléctrica como tal, sino como lo mencionamos en el capítulo 3 existen diversas aplicaciones para los aerogeneradores e inclusive actualmente se está utilizando la energía eólica para la generación de hidrogeno.

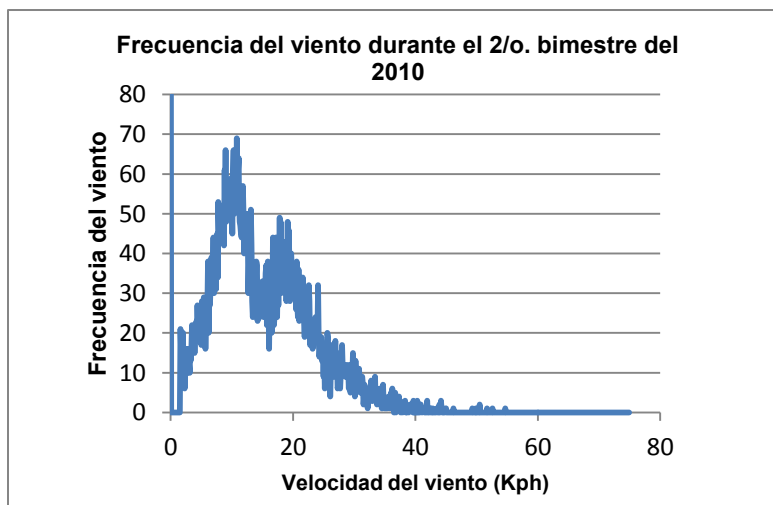
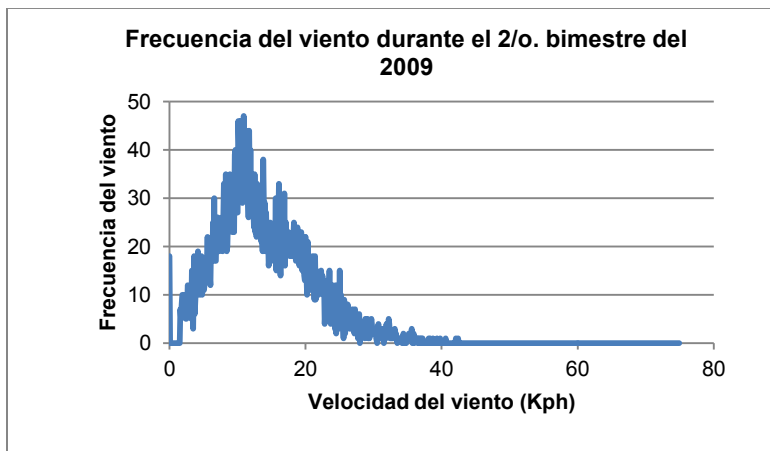
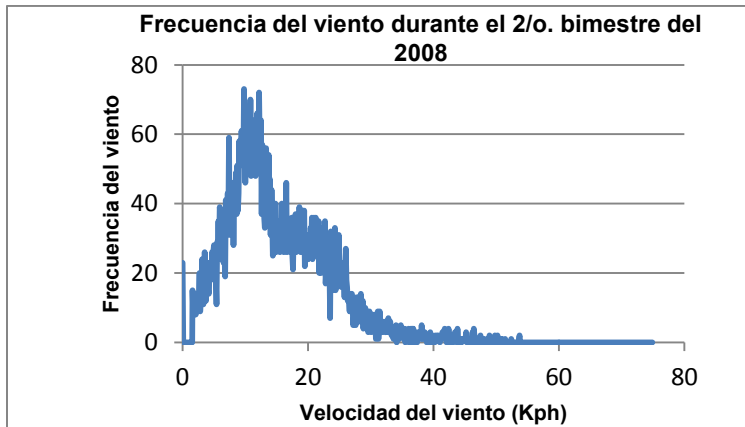
Aunque los resultados que se obtuvieron se logran de una forma muy practica y sencilla esta metodología puede ser un punto de partida para la evaluación en cualquier otra región de nuestro país.

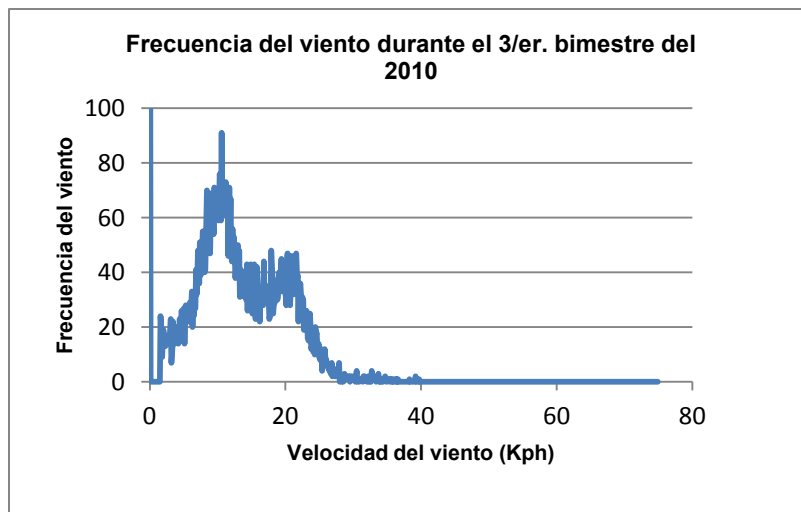
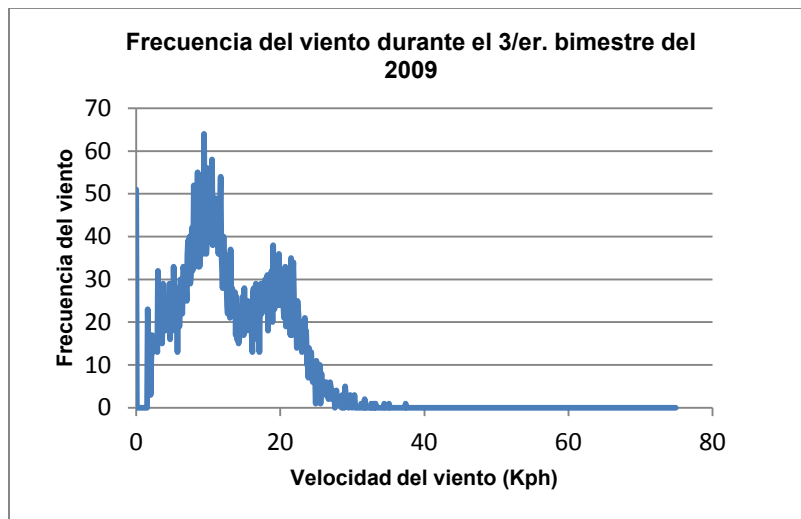
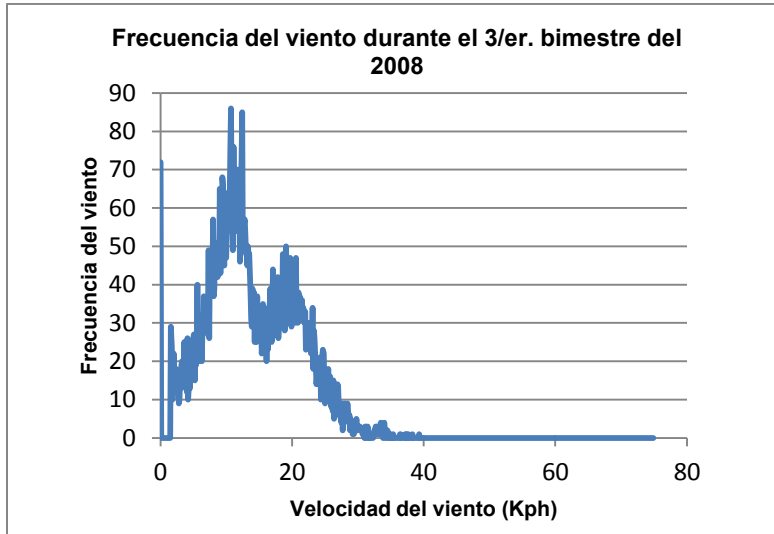
También tenemos que señalar que hoy en día existen softwares de evaluación del recurso eólico como lo son el WASP, windPRO, entre otros más, los cuales realizan la evaluación del recurso y permiten simular con más precisión el campo de viento, ya que disminuyen las incertidumbres de los cálculos especialmente en los emplazamientos situados en terreno complejo, pero también debemos contemplar que este tipo de software tienen precios elevados y no siempre tenemos acceso a ellos.

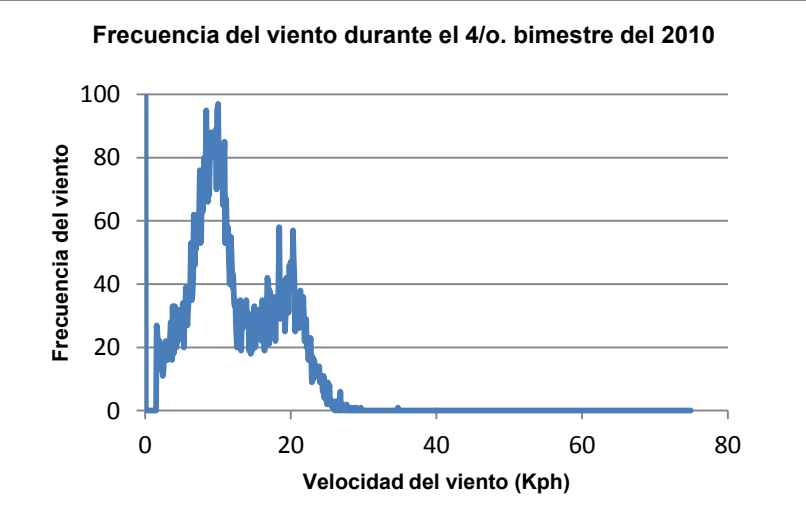
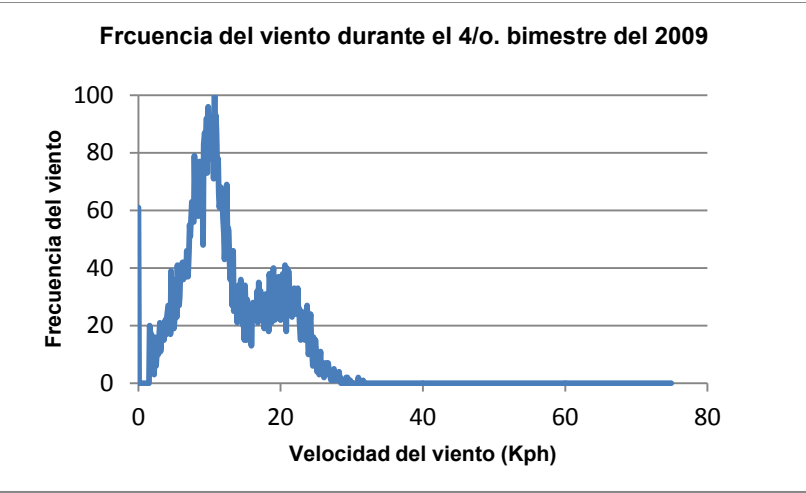
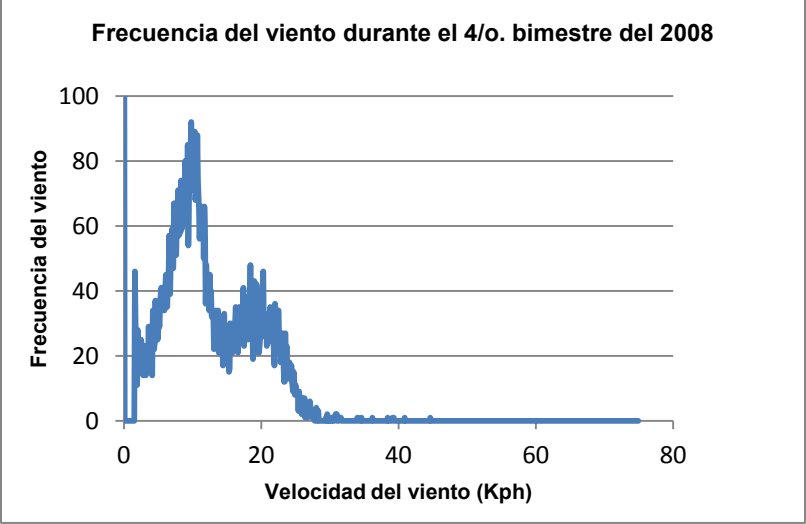
Por último solo queda mencionar que nuestra generación es testigo de los efectos que ha producido el cambio climático, y si bien es una polémica aun para muchos que se deba a la contaminación y uso de combustibles fósiles, nuestra obligación es aportar aunque sea algo mínimo para lograr una mejora y un cambio, tal vez no seamos un país que desarrolla tecnología, pero si podemos aprovechar la misma y utilizarla para contribuir al bienestar de nuestro planeta.

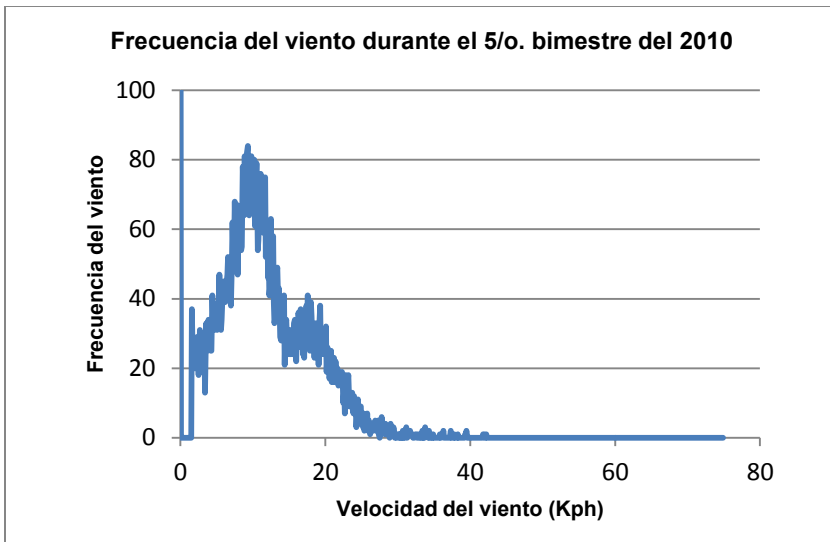
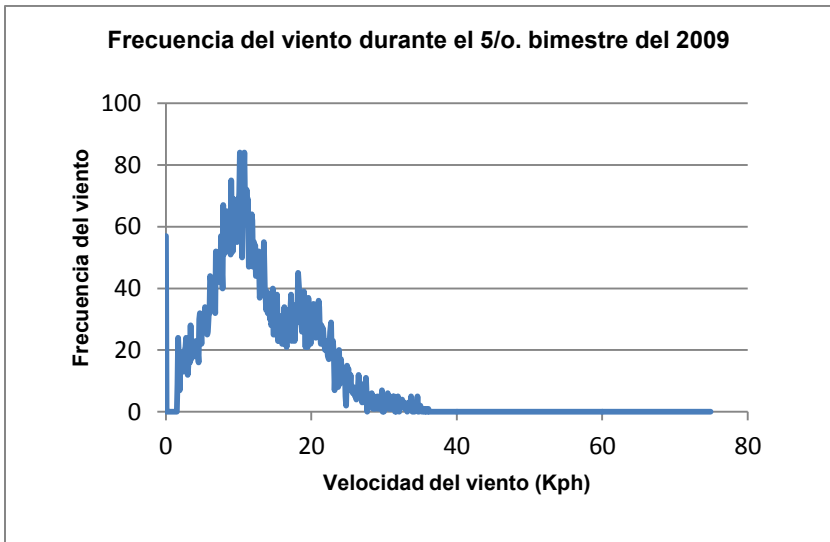
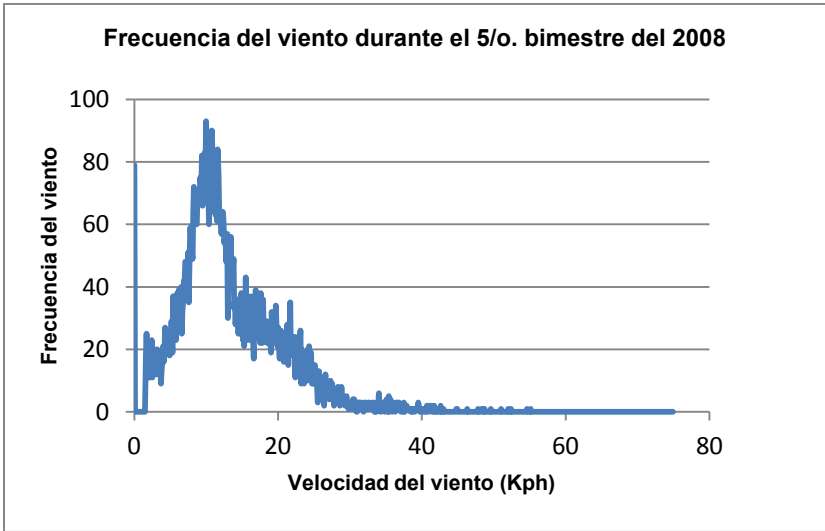
ANEXO "A" GRAFICAS DE EVALUACION BIMESTRALES

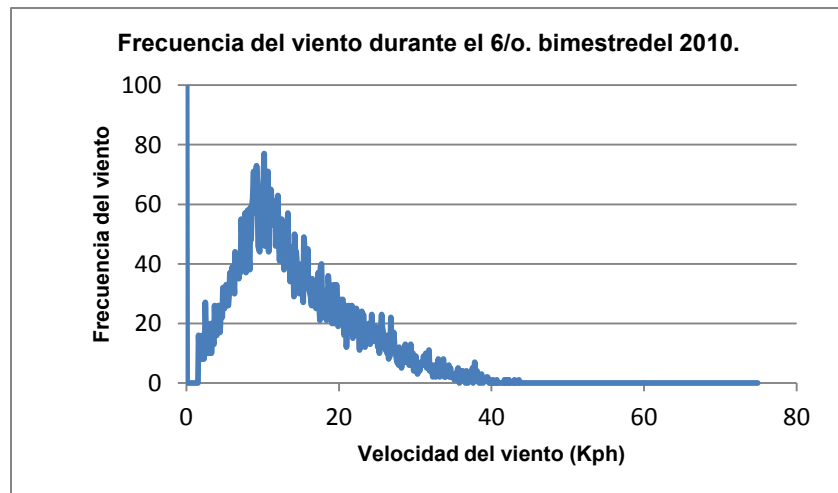
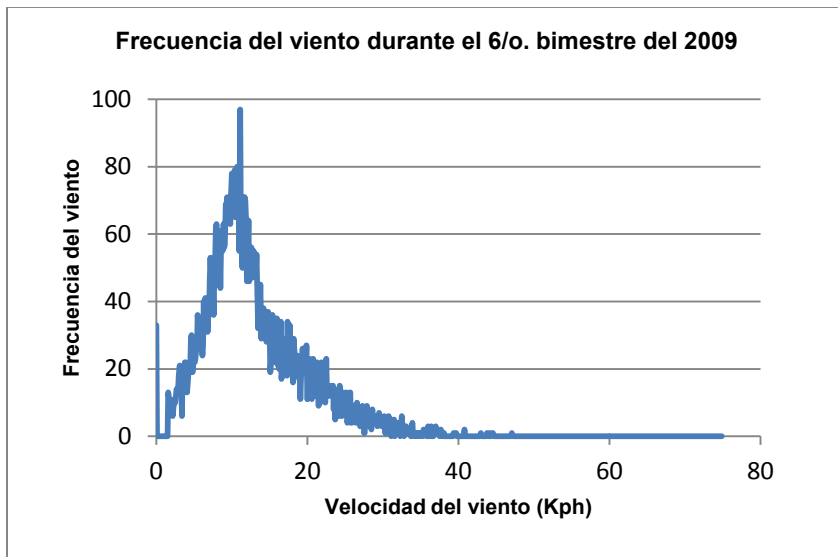
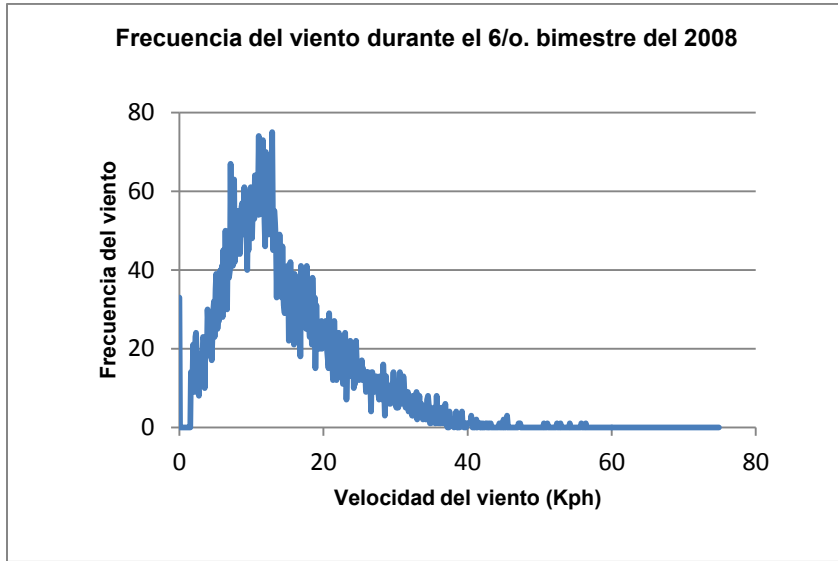












MEMORIA DE CÁLCULO

La extrapolación se usa para estimar la velocidad del viento a una determinada altura con base a datos medidos a una altura determinada, la información que se obtuvo fue a una altura de 10 metros y velocidades medias en promedio anual pero si quisiéramos obtener el dato de una velocidad a una mayor altura en este caso a 50 metros tendremos que utilizar la ecuación 2.14.

$$V = V_{ref} \times \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha$$

Donde :

α es el índice de la ley de potencia para la velocidad del viento.

V_{ref} (m/s): es la velocidad del viento a la altura de referencia.

h_{ref} . (m) es la altura de referencia, a las que se toma la medición.

h (m) es la altura a la que se desea conocer la velocidad del viento.

Pero antes de sustituir valores en la ecuación tenemos que obtener el coeficiente α de acuerdo con los datos que se obtuvieron en la primer evaluación anual a 10 metros de altura para esto se utilizara la ecuación 2.15.

$$\alpha = \frac{0.37 - 0.088 \ln(V_{ref})}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{h_{ref}}{10}\right)}$$

Ahora bien las velocidades medias que se obtuvieron fueron las siguientes:

En el 2008 3.42 m/s., para el 2009 3.28 m/s., y para el 2010 3.25 m/s.

Sustituyendo estos valores en la Ec 2.15:

$$\alpha = \frac{0.37 - 0.088 \ln(3.42)}{1 - 0.088 \ln(10/10)} = 0.261792$$

$$\alpha = \frac{0.37 - 0.088 \ln(3.28)}{1 - 0.088 \ln(10/10)} = 0.265470$$

$$\alpha = \frac{0.37 - 0.088 \ln(3.25)}{1 - 0.088 \ln(10/10)} = 0.266278$$

Al obtener el valor de α lo sustituimos en la ecuación 2.14:

$$V=3.42 \times (50/10)^{0.261792} = 5.2121 \text{ m/s.}$$

$$V=3.28 \times (50/10)^{0.265470} = 5.0284 \text{ m/s.}$$

$$V=3.25 \times (50/10)^{0.266278} = 4.9889 \text{ m/s.}$$

Para obtener el dato de la densidad de la localidad y no contamos con registro alguno, pero en cambio se conoce con datos como lo es la altura a nivel del mar en el que se encuentra la localidad y la temperatura media del ambiente, se puede recurrir a la ecuación 2.17 que es la siguiente expresión:

$$\rho = 1.225 \exp \left[\left(\frac{-h}{8435} \right) - \left(\frac{T - 15}{288} \right) \right]$$

Donde:

h es la altura del sitio sobre el nivel del mar (metros).

T es la temperatura ambiente promedio del sitio (°C).

$$\rho = 1.225 \exp[(-1262/8435) - (13.78 - 15/288)] = 1.059$$

Teniendo el dato de la densidad podemos obtener la potencia por unidad de area de acuerdo a la ecuacion 4.1:

$$IP = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} C_p \rho V^3$$

Cp. corresponde a la relación 2.21 de 0.593

Considerando que esta relación de viento se considera la máxima eficiencia que se le puede extraer del viento.

$$P = 1/2(0.593)(1.059)(5)^3 = 39.25 \text{ W/m}^2.$$

Cabe señalar que se realizan mas cálculos pero todos ellos se realizaron en Excel en virtud de que es demasiado extensa la información

Bibliografía

1. Desarrollo del mercado eléctrico 2006-2015. Comisión Federal de Electricidad. México, D.F., septiembre 2006.
2. Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión COPAR” (tomo de generación) 2005. Comisión Federal de Electricidad. México D.F., 2005.
3. Modelos econométricos sectoriales para la proyección del mercado eléctrico 2006-2015. Comisión Federal de Electricidad. México D.F., 2006.
4. Diccionario de sistemas eléctricos CEAC, editorial McGraw-Hill. México 1990 pág. 425.
5. Maquinas Eléctricas, Stephen J. Crapman. Editorial McGraw-Hill interamericana de México S.A. de C.V. 1988. pág. 650.
6. Beltrán H. “Electricity Resource Planning”, University of Illinois at Urbana Cham- paign, 2009.
7. CFE,. Copar de generación, Varios años.
8. IEA,.Key World Statistics 2008.
9. IEA, Clean Coal Technologies. 2008
10. IEA, Month Electricity Statistics.. Dec. 2008.
11. SENER, Prospectivas del sector eléctrico 2008.
12. Stephens Jennie c., Coupling CO2 Capture and Storage with Coal Gasification:
13. Energía a Debate, Año 5. Tomo V. No. 31. Mzo-abr 2009.
14. Vera G. O.A, “Centrales de ciclo combinado con gasificación integrada (CCGI): Una opción para la diversificación energética” UNAM, México, 2007.
15. McKinney, M.L. and Schoch, R.M., *Environmental Science, Systems and Solutions*. Third edition, University of Tennessee, Knoxville USA 2003.
16. Miller, G.T., *Living in the Environment: Principles, connections and solutions*. Fourth edition, Brooks/ Cole Publishing Company, Pacific Grove, USA 1999.
17. Sorrell, S., *Emissions Trading After Kyoto*. Introduction to Environmental Economics of Science and Technology Policy Research, 2004. Asselt, M.B.A. van, Rotmans, J., Uncertainty in Perspective. Global Env. Change 1996, Vol. 6, No. 2, p. 121-157
18. Janssen, M.A. and Carpenter, S.R., Managing the Resilience of Lakes: a Multi-agent Modeling Approach. Conservation Ecology, 1999 volume 2.
19. Estrategia Nacional para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía.
20. Estrategia integral para el fomento a la cogeneración en México, CONUEE Octubre 2008.
21. Balance Nacional de Energía 2009, SENER.
Jonson, Gary L. Wind Energy Systems (Sistemas de energía eólica). Manhattan, KS. EEUU: 10 de diciembre de 2001.
Moreno Figueredo, Conrado. Fundamentos para la selección y diseño de aerobombas. LaHabana: 1999.
Pinilla, Álvaro. Manual de aplicación de la energía eólica. WAsP 8 Help

- Facility and On-line Documentation (Útiles de ayuda y documentación en línea). Risoe National Laboratory, 1987-2007.
22. Cadenas R. y Saldívar G. (2007). "Educación y Nuevas Tecnologías Central Eoloeléctrica La Venta II".
 23. Comisión Federal de Electricidad. (2008). "Informe Anual 2008".
 24. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. (2003). "Zonas Potencialmente Productoras de Energía Eólica, en Baja California".
 25. Comisión Estatal de Energía. (2009). "Presentación de Política Energética, Energías Renovables".
 26. Gobierno del Estado de Baja California. (2009). "Proyecto Parque Eólico"
 27. Global Wind Energy Council. (2008). "Global wind energy outlook 2008"
 28. Ahmad Y Hassan, Donald Routledge Hill (1986). *Islamic Technology: An illustrated history*, p. 54.
 29. Recursos eólicos y cálculo de la producción de energía en aerogeneradores. Ib Troen & Erik Lundtang Petersen. 1991.
 30. Cómo funciona un aerogenerador Martin O.L. Hansen. 2000.
 31. Diseño de aerogeneradores. 2001
 32. R. Saldaña, Estado del arte y tendencia de la tecnología eoloeléctrica, 1998. UNAM
 33. J.P. Delgado Marín, La energía eólica en la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. PDF.
 34. Diseño de una Planta Desaladora de Agua de Mar, utilizando Energía Eoloeléctrica.
Johnson, Norman L.; Kotz, Samuel; Balakrishnan, N. (1994), *Continuous univariate distributions. Vol. 1, Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics: Applied Probability and Statistics (2nd edición)*, New York: John Wiley & Sons, MR1299979, ISBN 978-0-471-58495-7
 35. Gaussian class multivariate Weibull distributions: theory and applications in fading channels», Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Transactions on Information Theory* 51 (10): 3608–3619, doi:10.1109/TIT.2005.855598, MR2237527, ISSN 0018-9448
 36. Weibull, W. (1951), «A statistical distribution function of wide applicability», *J. Appl. Mech.-Trans. ASME* 18 (3): 293–297.
 37. *Engineering statistics handbook*. National Institute of Standards and Technology (2008).
 38. Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM.
 39. Betz, A. (1966) *Introduction to the Theory of Flow Machines*. (D. G. Randall, Trans.) Oxford: Pergamon Press.
 40. Asociación Mundial de Energía Eólica WWEA 2011.
 41. Estado del arte y tendencias de la tecnología eoloeléctrica. Marco A. Borja Díaz. p. 80. Año 2000.
 42. Notas de clase: Energía Eólica Aplicada con el Profesor Manuel Gordón. UAM Azcapotzalco.
 43. Lissaman, P.B.S., et al., *Critical issues in the design and assesment of wind turbine arrays*, procedins of the 4th Internacional Symposium on Wind Energy Systems, ISBN 0906085, Estocolmo, Suecia, 1982.

44. Manual de energía eólica investigación, diseño, promoción, Construcción y explotación de distintos tipos de instalaciones, Escudero López, José María, Mundi prensa, 2004.
45. Aprovechamiento de la energía eólica, Gipe, Paul, Mairena del Aljarafe: Progenza, 2000
46. Apuntes Modulo Energía Eólica. Salvador Cucó Pardillos. Curso

Páginas Web:

1. <http://www.energia.gob.mx> Secretaría de Energía
2. <http://www.cfe.gob.mx> Comisión Federal de Electricidad
3. <http://www.conae.gob.mx> Comisión Nacional para el Ahorro de Energía
4. <http://www.cre.gob.mx> Comisión Reguladora de Energía
5. <http://www.fide.gob.mx> Fideicomiso para el Ahorro de Energía
6. <http://www.iie.org.mx> Instituto de Investigaciones Eléctricas
7. www.monografias.com › Ingeniería.
8. www.lenntech.es/efecto_invernadero/combustibles_fosiles.htm
9. [villalbafosil.wordpress.com/origen de los combustibles fósiles](http://villalbafosil.wordpress.com/origen_de_los_combustibles_fosiles)
10. [Cambio climatico.ine.gob.mx](http://Cambio_climatico.ine.gob.mx)
11. www.ine.gob.mx
12. <http://www.atmosfera.unam.mx>
13. whitepaper.ises.org/ISES-WP-600-Spanish.pdf
14. www.sener.gob.mx/webSener/res/168/A11_GEObst.pdf
15. <http://www.astromia.com/tierraluna/vientolluvia.htm>
16. <http://nimbus.com.uy/weather/pdf/cap7.pdf>
17. [http://www.atmosphere.mpg.de/enid/Principales sistemas de vientos](http://www.atmosphere.mpg.de/enid/Principales_sistemas_de_vientos)
18. <http://es.libros.redsauce.net/index.php>
19. <http://www.textoscientificos.com/energia/eolica>
20. <http://www.anes.org/anes/index.php>
21. <http://web.ing.puc.cl/~power/alumno03/alternativa.htm>
22. <http://www.extractores.com.mx/energia/atmosferica.htm>
23. <http://www.monografias.com/trabajos82/aerogeneradores-generadores-electricidad-y-productores-agua/aerogeneradores-generadores-electricidad-y-productores-agua.shtml>
24. <http://www.energiasrenovables.ciemat.es/suplementos/renovables/eolica.htm>
25. www.wwindea.org
26. Asociación Mundial de Energía Eólica WWEA 2011
27. <http://www.nrel.gov/docs/pdf>
28. <http://www.igeograf.unam.mx/web/iggweb/index.html>
29. www.amdee.org/socios-de-amdee/recursos-eolicos-de-mexico
30. http://www.cfe.gob.mx/informe2008/capitulo3_1.html
31. <http://www.bajacalifornia.gob.mx>
32. Evaluacion del Recurso Eólico en Ciudad Universitaria
33. <http://smn.cna.gob.mx/>
34. <http://www.amdee.org/socios-de-amdee/instituto-de-investigaciones-electricas-iie>

35. www.gamesa.es GAMESA
36. Www.windpower.org Danish Wind Industry Association (Dinamarca).
37. www.idae.es Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
38. www.cener.com Centro Nacional de Energías Renovables.
39. www.ciemat.es Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas.
40. www.appa.es Asociación de Productores de Energías Renovables.
41. www.made.es MADE Tecnologías Renovables, S.A