



Instituto Politécnico Nacional  
Escuela Superior de Ingeniería y  
Arquitectura, Plantel Ticoman



Maestría en Geociencias y Administración de Recursos  
Naturales

**El uso de aeroventiladores para la generación de electricidad en  
plataformas petroleras**

Tesis que para obtener el grado de Maestro en Ciencias presenta:

**Raymundo Hernández Soto**

Directores de Tesis:

**Dr. Cayetano Miguel García Reyes**

**Dr. Luis Enrique Ortiz Hernández**



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 14:30 horas del día 29 del mes de Julio del 2010 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIA-U.Ticomán para examinar la tesis titulada:

"El uso de Aeroventiladores para la Generación de Electricidad en Plataformas Petroleras".

Presentada por el alumno:

Hernández  
Apellido paterno

Soto  
Apellido materno

Raymundo  
Nombre(s)

Con registro: 

B	0	9	1	4	5	7
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:  
MAESTRIA EN GEOCIENCIAS Y ADMINISTRACION DE LOS RECURSOS NATURALES

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

(Director)

(Codirector)

Dr. Cayetano Miguel García Reyes

Dr. Luis Enrique Ortíz Hernández

Dr. Daniel Romo Rico

M. en C. Rodrigo Mondragón Guzmán

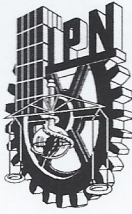
M. en C. Leobardo Salazar Peña

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Ing. Julio E. Morales de la Garza







# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTORES DE TESIS

México, D.F. a 14 de Octubre del 2011

El Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIA-U.Ticomán en su sesión Ordinaria No. 4 celebrada el día 26 del mes de Abril conoció la solicitud presentada por el(la) alumno(a):

Hernández  
Apellido paterno

Soto  
Apellido materno

Raymundo  
Nombre (s)

Con registro: 

B	0	9	1	4	5	7
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante de: MAESTRIA EN GEOCIENCIAS Y ADMINISTRACION DE LOS RECURSOS NATURALES

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado: "El uso de Aeroventiladores para la Generación de Electricidad en Plataformas Petroleras".

De manera general el tema abarcará los siguientes aspectos:  
Evaluación del potencial eólico en la sonda de Campeche y litoral de Tabasco, propuesta de un Proyecto de generación de energía eléctrica utilizando aeroventiladores en plataformas petroleras y la evaluación económica de dicho proyecto.

2.- Se designan como Directores de Tesis a los Profesores:  
Dr. Cayetano Miguel García Reyes (Director) y Dr. Luis Enrique Ortiz Hernández. (Codirector)

3.- El trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesina será elaborado por el alumno en: México, D.F.

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

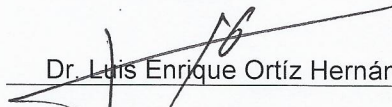
4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente hasta la aceptación de la tesis por la Comisión Revisora correspondiente:

Directores de Tesis

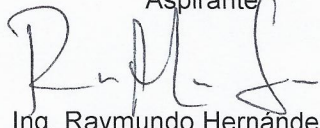
(Director)

  
Dr. Cayetano Miguel García Reyes

(Codirector)

  
Dr. Luis Enrique Ortiz Hernández

Aspirante

  
Ing. Raymundo Hernández soto

Presidente del Colegio

  
Ing. Julio E. Morales de la Garza





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESIÓN DE DERECHOS*

En la Ciudad de México el día 11 del mes de octubre del año 2011, el que suscribe, Raymundo Hernández Soto, alumno del Programa de Maestría en Geociencias y Administración de Recursos Naturales, con número de registro B091457, adscrito a la Sección de Posgrado e Investigación de la ESIA Ticoman, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Cayetano Miguel García Reyes y cede los derechos del trabajo titulado “El uso de aeroventiladores para la generación de energía eléctrica en plataformas petroleras”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección [Raymundo.hernandezs@pemex.com](mailto:Raymundo.hernandezs@pemex.com). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'R-H-S', is written over a horizontal line.

Ing. Raymundo Hernández Soto

Nombre y firma

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo con todo mi amor a mi hija María Fernanda y mi esposa Araceli quienes son la inspiración para seguir superándome cada día.

A mi mama Lulú que debe estar viéndome desde el cielo, gracias por el apoyo que siempre me diste.

A mi papa y hermanos por ser mi familia y estar siempre unidos.

A mi gran amigo y compadre Leonardo y a su familia por sembrar una amistad sólida y sincera.

A mi profesor y amigo Dr. Miguel García Reyes por sus consejos y apoyo incondicional.

Al Instituto Politécnico Nacional por darme la oportunidad de tener por segunda vez un alma mater y continuar formándome como profesionista y como persona.

Al comité revisor de este trabajo por su tiempo y valioso aporte para enriquecer esta tesis.

A mis profesores y compañeros de la maestría por brindarme su apoyo y amistad.

# Índice

	Pag
<b><u>Resumen</u></b>	
<b><u>Abstract</u></b>	
<b><u>Objetivo</u></b>	
<b><u>Introducción</u></b>	
<b>1. <u>Antecedentes</u></b>	
1.1 <u>Panorama general de los energéticos</u>	1
1.1.1 El contexto energético mundial	1
1.2 <u>Cambio climático y fuentes de energía</u>	3
1.2.1 Fuentes de energía no renovables	3
1.2.2 Cambio climático	9
1.2.3 Revolución energética	11
1.2.4 Energías renovables	12
1.3 <u>Perspectivas de la Energía Eólica</u>	14
1.3.1 Situación actual y proyecciones	16
1.4 <u>La energía eólica en México</u>	20
1.4.1 El panorama en México de la industria eólica	20
1.4.2 El recurso eólico de México	21
1.4.3 Capacidad de generación eólica	22
1.5 <u>Aspectos ambientales y ecológicos de la energía eólica</u>	25
<b>2. <u>Principios físicos y técnicos de la energía eólica</u></b>	
2.1. <u>Antecedentes históricos y estado actual de la energía eólica</u>	27
2.2. <u>Principios físicos de la energía eólica</u>	28
2.2.1. El recurso eólico	28
2.2.2. Patrones globales de circulación del viento	28
2.2.3. Tipos de vientos	30
2.3. <u>Aspectos técnicos de la energía eólica</u>	32
2.3.1. Velocidad del viento	32
2.3.2. Representación estadística del viento	34
2.4. <u>Tecnología de la energía eólica</u>	37
2.4.1. Clasificación de las maquinas eólicas	37
2.4.2. Componentes de los equipos de conversión de energía eólica	40
2.5. <u>Cálculos de potencia y energía</u>	43
2.5.1. Calculo de la potencia del viento	43
2.5.2. Metodología de evaluación de entrega de energía	44
2.6. <u>Información necesaria para evaluar el uso de la energía eólica</u>	47
2.6.1. Datos meteorológicos requeridos	47
2.6.2. Métodos utilizados para medir la velocidad del viento	48



<b>3.</b>	<b><u>Localización del proyecto y el potencial eólico de la zona</u></b>	
3.1.	<u>Antecedentes de la localización propuesta</u>	51
3.1.1.	Localización del proyecto	51
3.2.	<u>Filosofía de operación actual y propuesta</u>	55
3.2.1.	Sistema de generación actual	55
3.2.2.	Filosofía de operación propuesta	57
3.3.	<u>Información meteorológica</u>	58
3.3.1.	Área de estudio	59
3.3.2.	Presentación de datos meteorológicos	60
3.4.	<u>Procesado estadístico de datos</u>	61
3.4.1.	Datos meteorológicos 2006	62
3.4.2.	Datos meteorológicos 2007	64
3.4.3.	Datos meteorológicos 2008	66
3.4.4.	Datos meteorológicos 2009	68
3.4.5.	Datos meteorológicos 2010	70
3.5.	<u>Caracterización de los vientos</u>	72
3.5.1.	Velocidad promedio y clasificación de acuerdo al IEC	72
3.5.2.	Clasificación de los vientos de acuerdo al IEC – 64100	73
<b>4.</b>	<b><u>Calculo de energía y análisis financiero</u></b>	
4.1.	<u>Selección de las turbinas eólicas</u>	75
4.1.1.	Características técnicas de las turbinas	76
4.1.2.	Curvas de potencia de las turbinas	77
4.2.	<u>Calculo de la energía generada</u>	80
4.2.1.	Turbina VERGNET GEV HP - 1 MW	80
4.2.2.	Turbina VESTAS: V100-2.0 MW GridStreamer	82
4.2.3.	Turbina VESTAS V112-3.0 MW OFFSHORE	84
4.3.	<u>Análisis financiero</u>	86
4.3.1.	Turbina VERGNET GEV HP – 1.0 MW	90
4.3.2.	Turbina VESTAS: V100-2.0 MW GridStreamer	91
4.3.3.	Turbina VESTAS V112-3.0 MW OFFSHORE	93
4.3.4.	Resumen de evaluación	94
4.4.	<u>Análisis de sensibilidad</u>	96
4.5.	<u>Reducción de emisiones de GEI</u>	97
	<b><u>Conclusiones</u></b>	99
	<b><u>Referencias</u></b>	100

## Resumen

Este trabajo trata de determinar la viabilidad técnico – económico de un proyecto de generación de electricidad a partir de la energía eólica y lo compara con los métodos tradicionales. Se obtienen las ventajas económicas y ambientales al sustituir los actuales esquemas con los propuestos.

Primero se establece de forma breve el panorama general de los energéticos a nivel mundial, puntualizando los aspectos importantes del porque posicionar a las energías limpias y en particular a la eólica como fuentes alternas que sustituyan gradual y parcialmente a los combustibles fósiles. Se continúa con la explicación de los mecanismos de viento y los aspectos técnicos de la energía eólica.

Posteriormente se establece la localización del proyecto en la Sonda de Campeche y Litoral de Tabasco, mediante un software de procesamiento estadístico se analizan los datos meteorológicos del sitio, obtenidos de 6 estaciones de monitoreo meteorológico propiedad de PEMEX EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN (PEP), para evaluar el potencial eólico de la zona.

Con la caracterización de los vientos obtenido, se determina si el proyecto es viable desde el punto de vista técnico, una vez confirmado este punto, se selecciona la tecnología más adecuada para las condiciones de viento predominantes y las características de la zona, se cruza la información de viento y de los aerogeneradores seleccionados y se obtienen las curvas de energía que se podría generar durante la vida del proyecto.

De la literatura disponible, se obtienen los costos promedio para la construcción de una central eólica en el mar, los costos de operación y mantenimiento durante la vida del proyecto y los ingresos promedio por venta de la energía. Con estos datos, se efectúa un análisis financiero que nos proporciona la rentabilidad o la viabilidad financiera del proyecto.

Para determinar si el proyecto sigue siendo rentable en las condiciones extremas, se realiza un análisis de sensibilidad variando los datos que podrían afectar los indicadores del proyecto.

Es importante mencionar que los capítulos I y II son los antecedentes necesarios para la entrada a los capítulos III y IV los cuales al punto de vista de este autor es la verdadera aportación de este trabajo ya que se realiza la evaluación del potencial eólico de la Sonda de Campeche y del Litoral de Tabasco, para determinar si los proyectos de energía eólica son viables desde el punto de vista técnico y financiero.



## Abstract

This work is about determining the viability technician - economic of a generation project of electricity starting from the eolic energy and it compares it with the traditional methods. The advantages are obtained economic and environmental when substituting the current outlines with those proposed.

First settle down in a brief way the general panorama from the energy ones to world level, remarking the important aspects of the because to position to the clean energies and in particular to the eolic one as sources alternating that substitute gradual and partially to the fossil fuels. We continues with the explanation of the mechanisms of wind and the technical aspects of the eolic energy.

Later on the localization of the project settles down in the Sonda de Campeche and Litoral de Tabasco, by means of software of having processed statistical the meteorological data of the place are analyzed, obtained of six meteorological monitors stations property of PEMEX EXPLORATION AND PRODUCTION (PEP), for to evaluate the eolic potential of the area.

With the characterization of the obtained winds, it is determined if the project is viable from the point of view technician. Once confirmed this point, the most appropriate technology is selected for the conditions of predominant wind and the characteristics of the area, we combined the information of wind and of those selected eolic turbines and after that we obtain the energy curves wich show us the quantity of energy that we will obtained during the life of the one project.

Of the available literature, the costs average are obtained for the construction of an eolic power station in the offshore, the operation costs and maintenance during the life of the project and the revenues average for sale of the energy. With these data, a financial analysis is made that provides us the profitability or the financial viability of the project.

To determine if the project continues being profitable under the extreme conditions, we are carried out an analysis of sensibility varying the data that could affect the indicators of the project.

It is important to mention that the chapters I and II are the necessary because they are antecedents for the entrance to chapters III and IV, which it is since the true contribution of this work to this author's point of view is carried out the evaluation of the eolic potential of the Sonda de Campeche and of the Litoral de Tabasco, for to determine if the projects of eolic energy are viable from the technical and financial point of view.

## Objetivo de este trabajo

Evaluar el potencial eólico de la Sonda de Campeche y Litoral de Tabasco para determinar la rentabilidad de los proyectos eólicos a fin de detonar el desarrollo de este tipo de energía en la zona de estudio.

## Introducción

Por mucho tiempo la humanidad ha hecho un uso intensivo de los combustibles fósiles derivado en gran medida de la versatilidad de los mismos y por la facilidad hasta hace poco de conseguirlo, por otra parte, los intereses económicos entorno a los hidrocarburos han hecho que la investigación y desarrollo de otras fuentes de energía sea muy lenta.

En la actualidad cada vez es más complicada la búsqueda y extracción de los hidrocarburos, derivado de esto los precios de los mismos se incrementan considerablemente conforme incrementa la demanda y disminuyen las reservas mundiales. Adicionalmente los estudios actuales en materia ambiental arrojan resultados alarmantes respecto al cambio climático y deterioro del medio ambiente debido al calentamiento global por el uso de los combustibles.

Tomando en cuenta lo anterior, se requiere urgentemente el desarrollo de fuentes de energías renovables y limpias que ayuden a sustituir parcialmente, de forma eficiente y rentable, a los combustibles fósiles.

En este contexto las energías renovables son fuentes de abastecimiento energético que no dañan el medio ambiente ya que no generan residuos de difícil tratamiento. La energía nuclear y los combustibles fósiles generan residuos que suponen durante generaciones una amenaza para el medio ambiente. Los impactos ambientales de las energías renovables son siempre impactos reversibles.

El generar energía eléctrica sin que exista un proceso de combustión o una etapa de transformación térmica supone, desde el punto de vista medioambiental, un procedimiento muy favorable por ser limpio, exento de problemas de contaminación, etc.

De las energías renovables, la eólica es una de las que presentan mayor desarrollo y mejores resultados desde el punto de vista económico y de eficiencia energética. El potencial y la versatilidad son muy amplios ya que se pueden posicionar proyectos eólicos tanto en el mar como en tierra, siempre que exista un potencial eólico importante.

En el ámbito internacional, las energías renovables cada vez toman más importancia y se les impulsa de manera considerable, China, Estados Unidos, Unión Europea e India son los países que hasta el momento lideran el desarrollo de esta tecnología.

Datos de la Agencia Internacional de Energía Eólica arrojan un crecimiento de 23% de 2009 a 2010, al pasar de 160 a 197 GW instalados en un año. Sin duda es un crecimiento importante y posiciona a la energía eólica como las de mayor crecimiento de entre las energías renovables.

También es importante que con este desarrollo los costos de instalación y generación disminuyan cada vez más y hace que la energía eólica sea más rentable y pueda competir en precio con otras fuentes de energía como los combustibles fósiles. Un informe de 2009 de la European Wind Energy Association muestra datos que indican en promedio que el costo de generación del Kwh bajo de 11 a 6 centavos de Euro de 1987 a 2006, así mismo los costos de instalación de centrales eólicas han bajado de 1800 a 1400 euros por Kw instalado.

Si bien a nivel internacional se han efectuado esfuerzos considerables para el desarrollo de la energía eólica, en México apenas se están aplicando las medidas necesarias para la promoción de esta fuente renovable,

pero aun hacen falta políticas más agresivas que ayuden a nuestro país a depender en menor medida de los combustibles fósiles. Datos de la Secretaria de Energía muestran que las energías renovables, al 2008, aportan solo el 3.9% del total de energía eléctrica y la eólica solo representa el 0.11%.

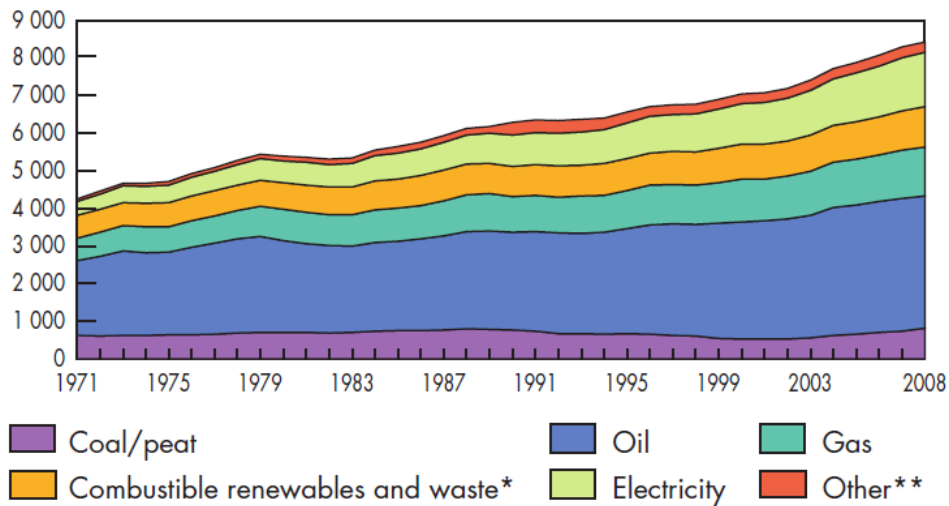
Sin embargo es importante mencionar que México paso de tener 2 GW instalados en 2006 a 85 en 2007 con los desarrollos de la Venta, Oaxaca. Si bien estos avances son importantes hace falta continuar con el desarrollo más agresivo ya que los datos arrojan que tenemos un potencial eólico importante.

# Capítulo I. Antecedentes

## 1.1 Panorama general de los energéticos

### 1.1.1 El contexto energético mundial

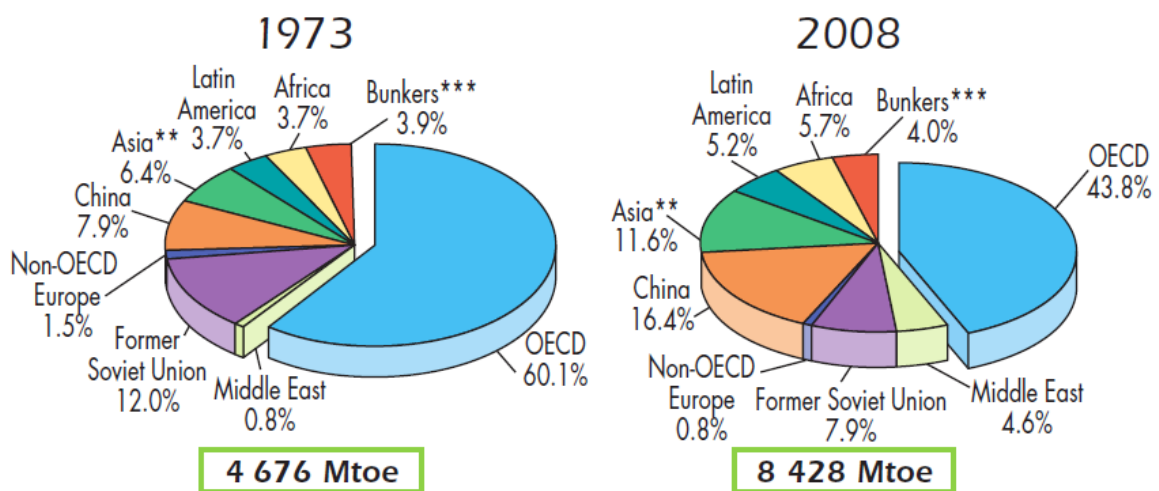
En las últimas décadas la demanda energética mundial ha tenido un crecimiento considerable (Gráfica 1.1 y 1.2), esto derivado del crecimiento económico de los países asiáticos y las economías emergentes de América Latina.



Gráfica 1.1 Evolución del consumo mundial de energía primaria por combustible

(Millones de toneladas de petróleo crudo equivalente, Mtoe), 1 toe = 7.33 boe, barriles de aceite equivalente

Fuente: Key World Energy Statistics. International Energy Agency, 2010 (KWES, IEA, 2010)



Gráfica 1.2 Distribución por países del consumo mundial de energía primaria

Otros incluyen: energía geotérmica, solar, eólica, etc.

Fuente: KWES, IEA, 2010

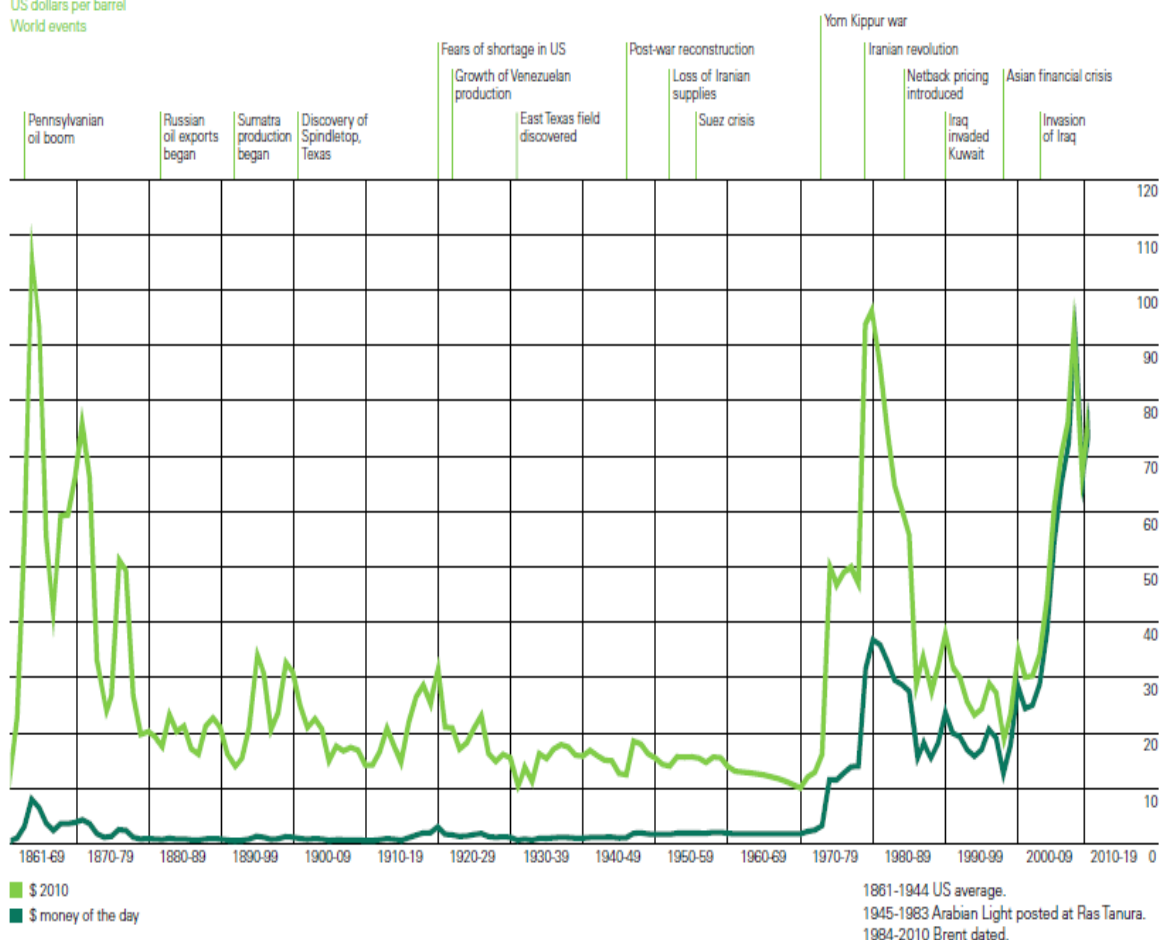
De la gráfica 1.2 se observa que de 1973 a 2008 se ha tenido un incremento en el consumo de energía de 3752 Mtoe en solo 35 años o lo que es lo mismo, ha incrementado en un 44%, esto principalmente a China, Asia y Medio Oriente los cuales han duplicado su consumo energético.

En este contexto, de necesidad de recursos energéticos, se ha desencadenado un fuerte incremento en los precios de los combustibles fósiles en particular del petróleo, derivado principalmente por la ley de oferta – demanda y de los conflictos bélicos mundiales (gráfica 1.3), lo cual hace que los precios sean muy inestables y cause incertidumbre en torno a la seguridad en el suministro energético.

De aquí que se desprende la necesidad de buscar nuevas alternativas de energía y desarrollar las existentes a fin de sustituir gradualmente la demanda de combustibles fósiles, disminuir los costos y asegurar el suministro energético.

### Crude oil prices 1861-2010

US dollars per barrel  
World events

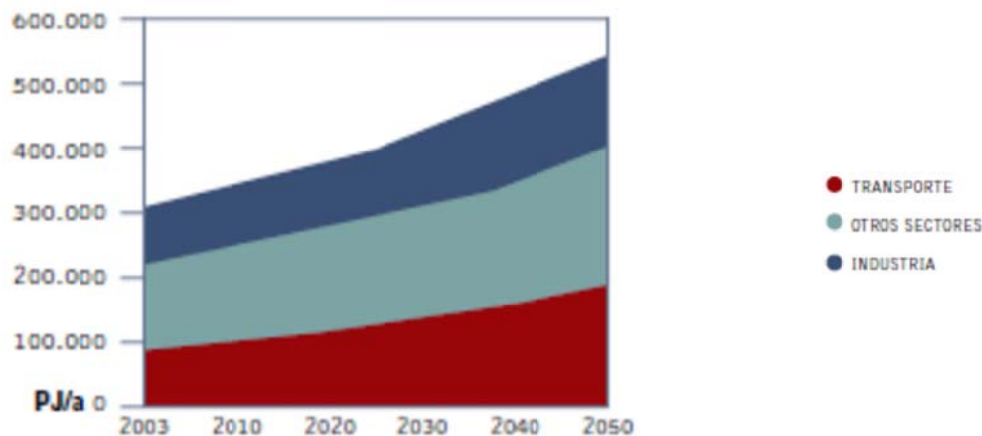


Gráfica 1.3 Evolución del precio del petróleo en USD/Bls de acuerdo a la oferta y demanda y a los conflictos bélicos mundiales

Fuente: KWES, IEA, 2010

Adicionalmente la perspectiva de la demanda mundial de energéticos en las próximas décadas se observa a la alza (gráfica 1.4), así mismo las reservas de combustibles fósiles se proyectan a la baja, además del deterioro del medio ambiente derivado del uso de estos últimos, se acentúa aún más la necesidad de desarrollar las fuentes de energía que sustituyan a las actuales, que proporcionen seguridad en el suministro y sean ambientalmente sostenibles.





Gráfica 1.4. Proyección de la demanda mundial de energéticos por sector (Peta Joule por año, 1 Mtoe = 41.868 PJ)

Fuente: Revolución Energética, Perspectiva Mundial de la Energía Renovable. Greenpeace Internacional, Consejo Europeo de Energías Renovables (EREC), Enero 2007.

De la gráfica se observa que de seguir las tendencias, se podría llegar en 2050 a una demanda global de energía de 550,000 TJ, lo cual daría un aproximado de 13,136 Mtoe o un incremento de 64% respecto a 2008. Por esta razón es necesario que se busquen nuevas fuentes o se desarrollen las existentes a fin de suplir el incremento de la demanda global de energía.

## 1.2 Cambio climático y fuentes de energía

### 1.2.1 Fuentes de energía no renovables

Las fuentes de energía no renovables o combustibles fósiles han suministrado energía al mundo desde los inicios de era industrial y han sido el motor del desarrollo mundial y la vía para la mejora del bienestar humano a lo largo de la historia.

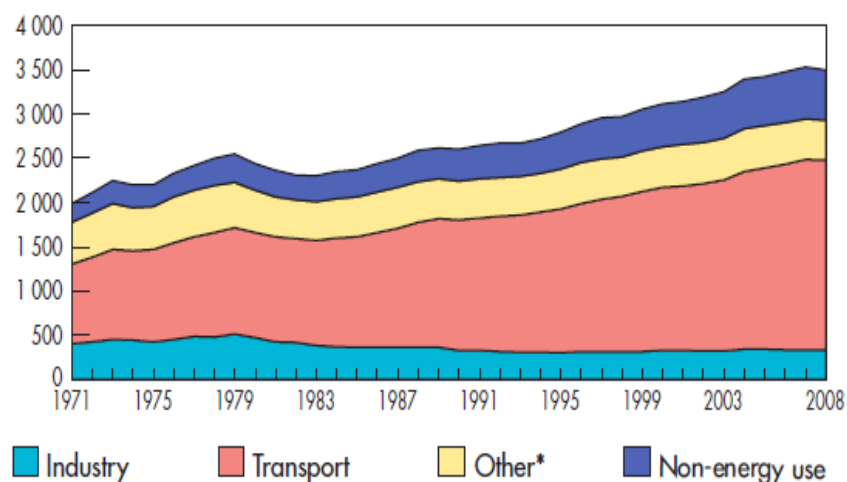
Sin embargo estas fuentes por ser de origen fósil conllevan muchas desventajas tal como que son no renovables, es decir, que se agotan conforme se consumen, así como al momento de su búsqueda y extracción y al utilizarlas como fuente de energía, generan contaminación que daña el medio ambiente y por consecuencia alteran el equilibrio climatológico. A continuación se da una breve semblanza de los combustibles fósiles más comunes.

**Petróleo.** Es la fuente principal de energía, suple el 36% de las necesidades mundiales, y es el combustible utilizado casi exclusivamente para usos esenciales como cubrir cerca del 90% del transporte <sup>(1)</sup>.

Según un estudio de la Energy Watch Group (EWG) del 2007, el pico de producción mundial se alcanzó en 2006 y tendremos una declinación de la producción en los próximos décadas del 7% anual, agravándose esta declinación en el 2030. Comparando estos datos con la demanda de energía proyectada para las siguientes décadas se observa un déficit que de alguna forma se tiene que compensar. La gráfica 1.5 y 1.6 muestran la evolución del consumo global de petróleo y la distribución por sector en Mtoe.

Aún más alarmante, según el estudio del Energy Watch Group del 2007, con las reservas probadas mundiales y el consumo actual solo tendríamos petróleo para un periodo de 28 años <sup>(1)</sup>. Dicho estudio se basa en dos puntos: 1. Las reservas probadas en la realidad son inferiores a las que se reportan y 2. Las

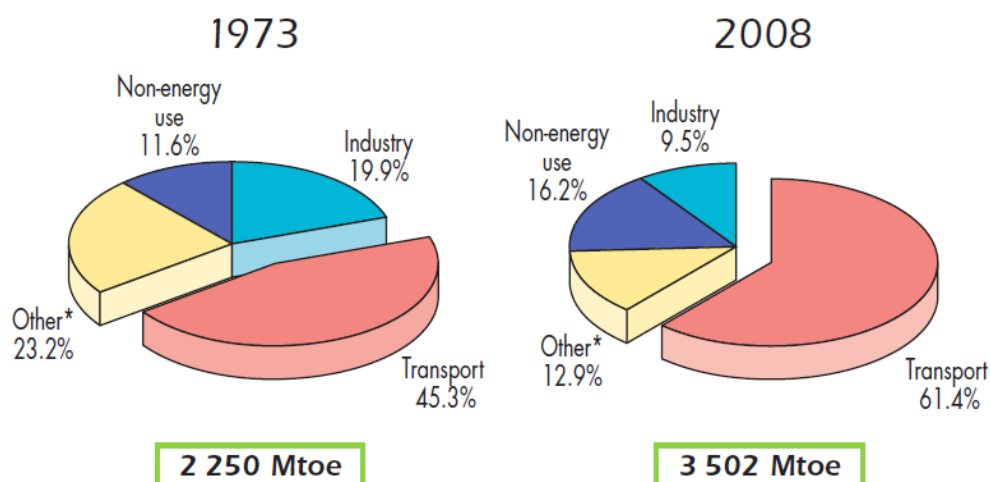
reservas probadas son más difícil de extraer de lo que se pensaba y actualmente no se tiene la eficiencia requerida.



Gráfica 1.5 Evolución del consumo mundial de petróleo por sector (Mtoe)

Otros incluyen: Agricultura, servicios públicos y comerciales, residencial y otros no especificados.

Fuente: KWES, IEA, 2010



Gráfica 1.6 Distribución del consumo mundial de petróleo por sector

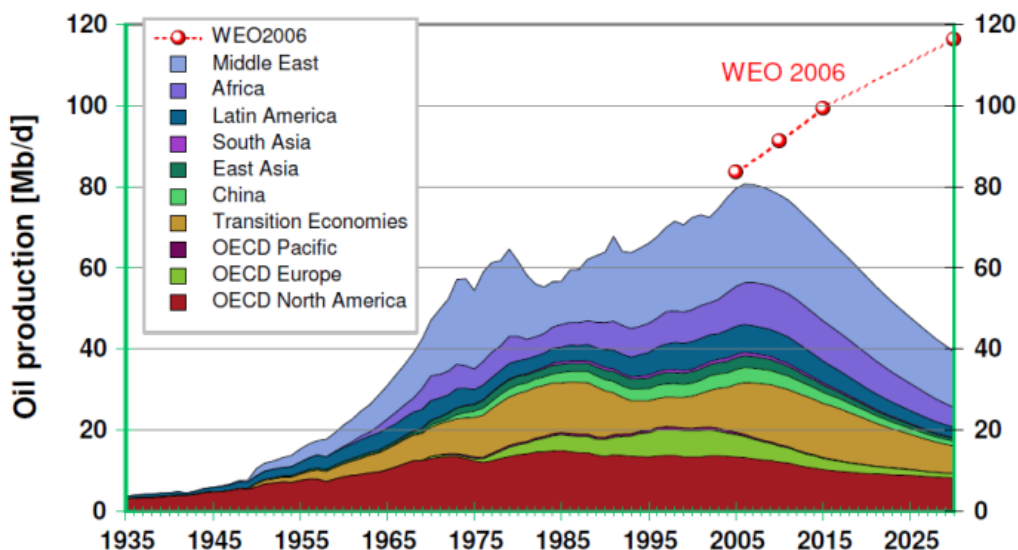
Otros incluyen: Agricultura, servicios públicos y comerciales, residencial y otros no especificados.

Fuente: KWES, IEA, 2010

Aunque estos pronósticos difieren de los de otros estudios de energía como el BP Statistical Review of World Energy, Junio 2011 que indica que con las reservas probadas actuales de 1383000 millones de barriles, MMB (considerando las arenas bituminosas de Canadá son 1526 MMB) y la producción actual de 82.1 MMBPD da una relación reservas – producción para 46 años. Así mismo el Word Energy Outlook (WEO) que pronostica un crecimiento en la producción para 2035, llegando a 99 MMBLS (15 MMBLS más de lo que se produjo en 2009) <sup>(2)</sup>.

Independientemente del estudio que se trate, ya que todos dan diferentes proyecciones, coinciden en un punto por demás importante, el petróleo está en franca declinación y de un momento a otro el mundo se puede ver inmerso en una crisis energética por lo que es necesario apuntar a otras fuentes de energía que sean sustentables en el tiempo y viables ambiental y económicamente.

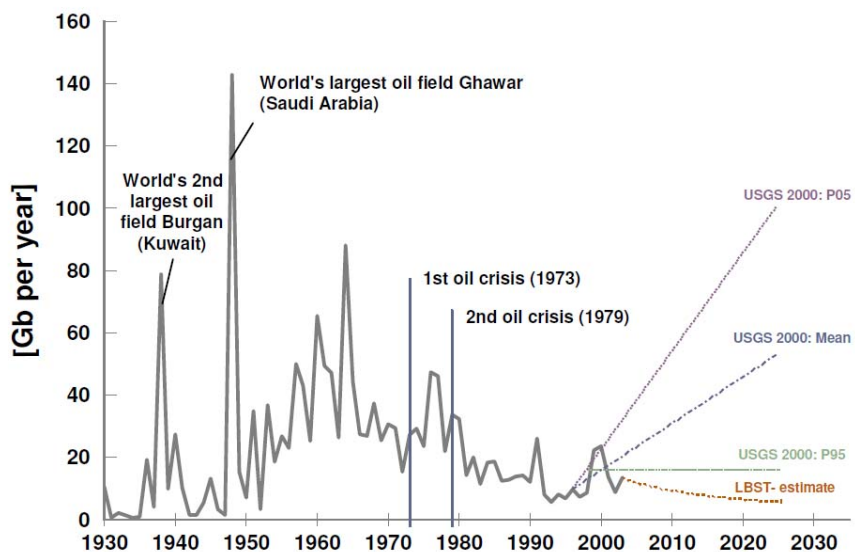
La grafica 1.7 ilustra la producción mundial desde 1920, como se comentó se tiene en 2006 el pico de producción y a partir de este año una declinación anual del 7%.



Grafica 1.7 Evolución de la producción mundial histórica de petróleo y proyección (millones de barriles por día)

Fuente: CRUDE OIL THE SUPPLY OUTLOOK. Reporte de Energy Watch Group. Octubre, 2007

La grafica 1.8 ilustra la tendencia en cuanto a descubrimientos de petróleo, se observa que de 1950 a 1980 se tuvieron los descubrimientos más importantes y a partir de 1980 se tiene una disminución en los mismos.



Grafica 1.8 Histórico de descubrimientos de petróleo (Reservas probadas + probables de aceite y condensado)

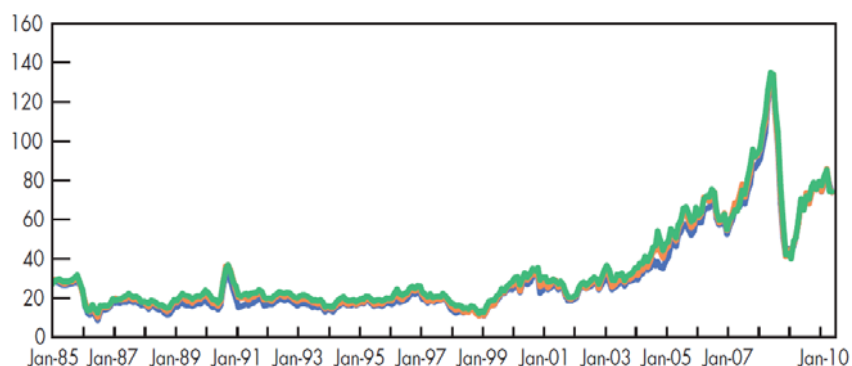
Datos en Gb, 1Gb = 1000 MMB (millones de barriles)

Fuente: CRUDE OIL THE SUPPLY OUTLOOK. Reporte de Energy Watch Group. Octubre, 2007

<sup>1</sup> CRUDE OIL THE SUPPLY OUTLOOK. Reporte to the Energy Watch Group. Octubre, 2007

<sup>2</sup> World Energy Outlook. International Energy Agency, 2010

La grafica 1.9 ilustra la evolución en el precio de los crudos marcadores.



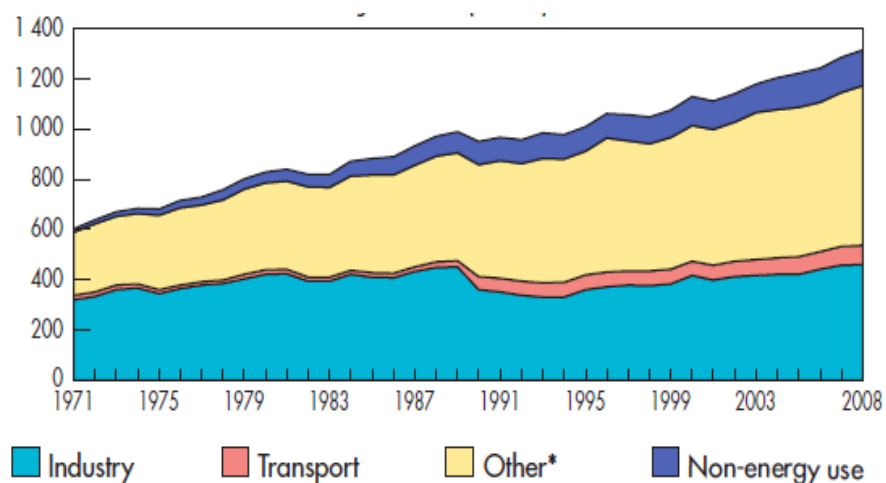
Grafica 1.9 Evolución del precio de los crudos marcadores en USD/Bls (Dubai, BRENT, WIT)

Fuente: KWES, IEA, 2010

**Gas.** El gas natural ha sido la fuente de energía fósil de mayor crecimiento durante las últimas dos décadas, empujado por su mayor participación en la generación de electricidad. Actualmente cubre cerca del 21% del consumo mundial de energía primaria. Datos de la IEA del 2010 muestran que de 1973 a 2010 se pasó de producir 1226 a 3193 billones de metros cúbicos (bcm) y las reservas probadas de gas al 2010, son del orden de 187 trillones de metros cúbicos, lo cual da una relación reservas – producción de 58.6 años<sup>(3)</sup>.

Según el World Energy Outlook del 2010 se espera que el gas natural alcance una demanda de 4500 bcm para 2035 a una tasa de aumento de 1.4% anual y será el único combustible fósil que su demanda será mayor en 2035 que en 2008. Debido al incremento en los precios del petróleo se prevé que esta fuente de energía supla en gran medida las necesidades energéticas de las nuevas potencias económicas como China e India.

La grafica 1.10 y 1.11 muestran la evolución mundial y la distribución por sector en el consumo de gas natural en Mtoe.

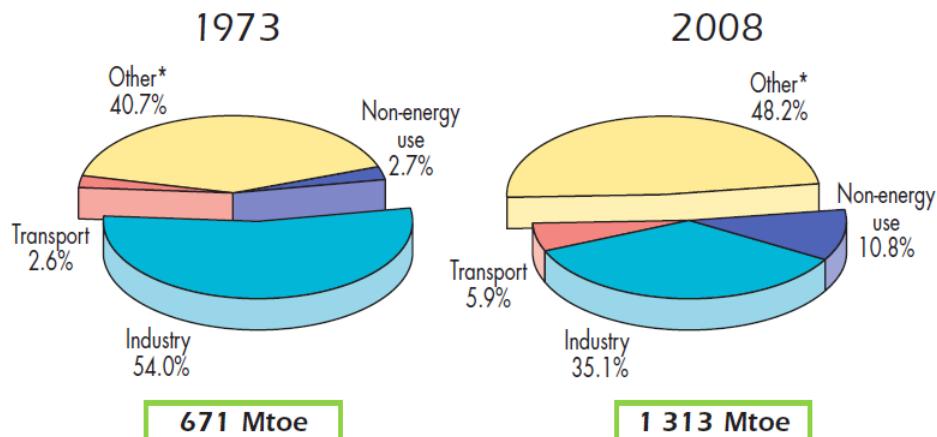


Grafica 1.10 Evolución del consumo mundial de gas natural por sector (Mtoe)

Otros incluyen: Agricultura, servicios públicos y comerciales, residencial y otros no especificados.

Fuente: KWES, IEA, 2010

<sup>3</sup> BP Statistical Review of World Energy, June 2011

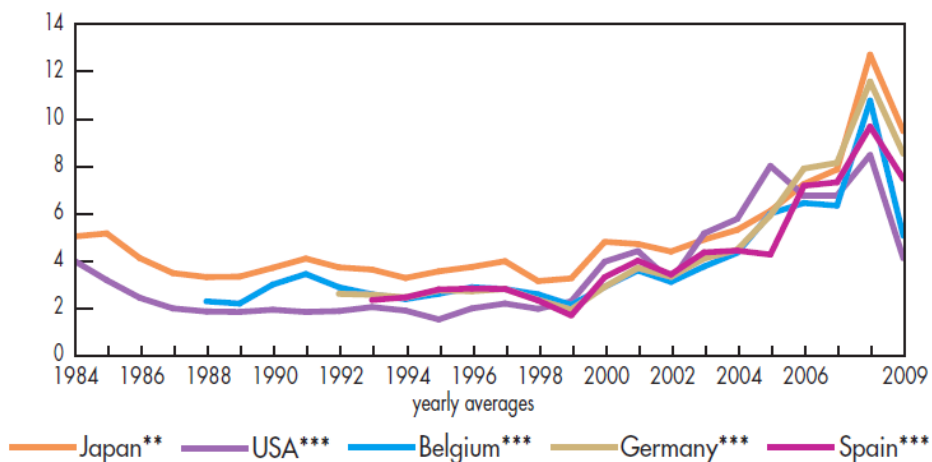


Gráfica 1.11 Distribución por sector del consumo mundial de gas natural.

Otros incluyen: Agricultura, servicios públicos y comerciales, residencial y otros no especificados.

Fuente: KWES, IEA, 2010

La grafica 1.12 muestra la evolución de los precios del gas.



Gráfica 1.12 Evolución del precio del gas para diferentes países

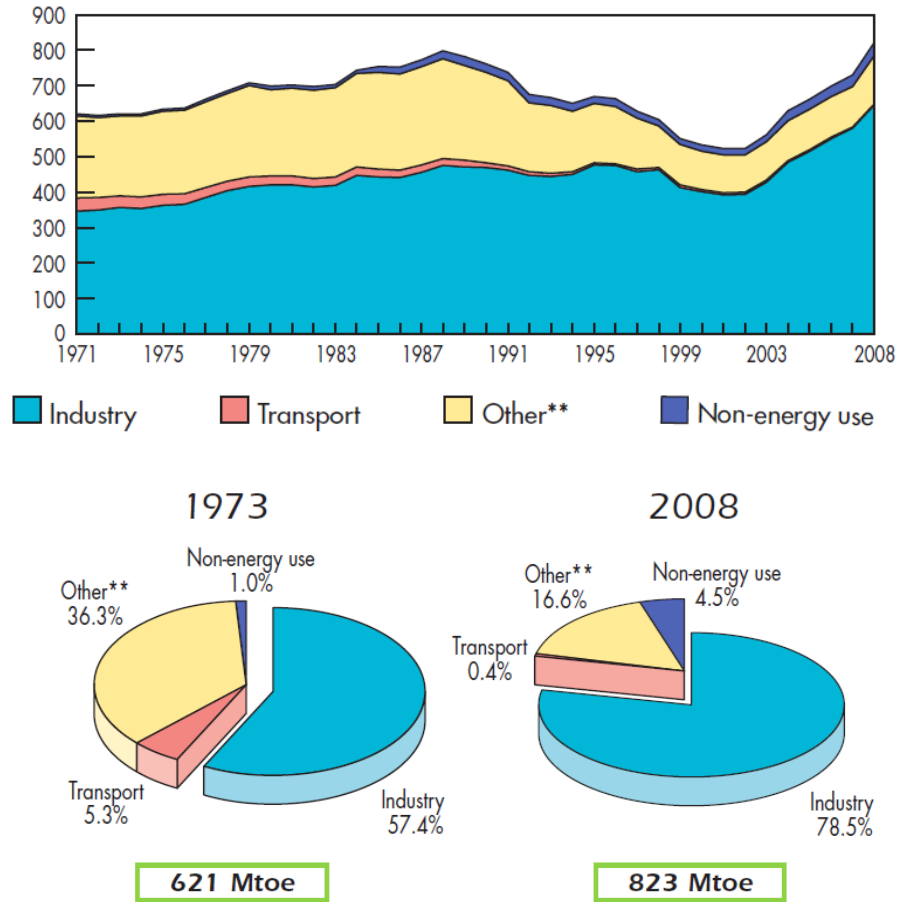
Datos en dólares americanos por millón de British thermal units (USD/MBTU), 1 MBTU =  $2.52 \times 10^8$  Mtoe

Fuente: Fuente: KWES, IEA, 2010

**Carbón.** El carbón fue la principal fuente de energía primaria hasta los años 60, cuando fue superado por el petróleo. Hoy día el carbón suministra cerca del 25% del consumo mundial de energía primaria. A pesar de ser el combustible fósil más abundante, su uso se ve amenazado por consideraciones medioambientales.

Datos del BP Statistical Review of World Energy del 2011 arrojan reservas por 860938 Mt y un consumo mundial de 3556 Mtoe, extrapolando las previsiones sobre demanda, el mundo consumirá el 20% de sus reservas actuales para 2030 y el 40% para 2050, por lo que, de mantenerse las tendencias actuales, sus reservas durarán aproximadamente 100 años<sup>(4)</sup>. La grafica 1.13 y 1.14 muestran la evolución y la distribución por sector del consumo mundial de carbón.





Grafica 1.13 Evolución del consumo mundial de carbón (Mtoe)

Otros incluyen: Agricultura, servicios públicos y comerciales, residencial y otros no especificados.

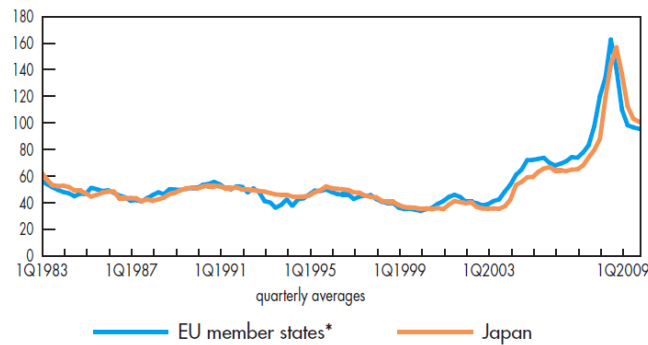
Fuente: KWES, IEA, 2010

Grafica 1.14 Distribución por sector del consumo mundial de carbón

Otros incluyen: Agricultura, servicios públicos y comerciales, residencial y otros no especificados

Fuente: KWES, IEA, 2010

La grafica 1.15 muestra la evolución de los precios del carbón.



Grafica 1.15 Evolución del precio del carbón para diferentes países. (USD/ton), 1 MBTU = 2.52. Fuente: Fuente: KWES, IEA, 2010

Las tabla 1.1 muestra las cifras estimadas de reservas para diferentes fuentes de energía fósiles

VECTOR ENERGÉTICO	BROWN, 2002 EJ	IEA, 2002c EJ	IPCC, 2001a EJ	NAKICENOVIC ET AL., 2000 EJ	UNDP ET AL., 2000 EJ	BGR, 1998 EJ
<b>Gas</b> reservas	6,600	6,200	c 5,400 nc 8,000	c 5,900 nc 8,000	c 5,500 nc 9,400	c 5,300 nc 100
recursos	9,400	11,100	c 11,700 nc 10,800	c 11,700 nc 10,800	c 11,100 nc 23,800	c 7,800 nc <sup>9)</sup> 111,900
existencias			796,000	799,700	930,000	
<b>Petr.</b> reservas	5,800	5,700	c 5,900 nc 6,600	c 6,300 nc 8,100	c 6,000 nc 5,100	c 6,700 nc 5,900
recursos	10,200	13,400	c 7,500 nc 15,500	c 6,100 nc 13,900	c 6,100 nc 15,200	c 3,300 nc 25,200
existencias			61,000	79,500	45,000	
<b>Carb.</b> reservas	23,600	22,500	42,000	25,400	20,700	16,300
recursos	26,000	165,000	100,000	117,000	179,000	179,000
existencias			121,000	125,600		
<b>Total recurso (reservas + recursos)</b>	<b>180,600</b>	<b>223,900</b>	<b>212,200</b>	<b>213,200</b>	<b>281,900</b>	<b>361,500</b>
<b>Total de existencias</b>			<b>1,204,200</b>	<b>1,218,000</b>	<b>1,256,000</b>	

Tabla 1.1. Reservas, recursos y existencias de los combustibles fósiles, según diferentes autores.

Datos en Exa Joule (EJ), 1 Mtoe = 0.04168 EJ. Fuente: Revolución Energética. Greenpeace y EREC, Enero 2007

## 1.2.2 Cambio climático

El efecto invernadero es un proceso natural y de esta manera benéfico para el planeta, mediante dicho proceso la atmósfera atrapa parte de la energía solar, calentando la Tierra y moderando naturalmente nuestro clima. El aumento de los gases de efecto invernadero provocado por el hombre al quemar combustibles fósiles, está aumentando artificialmente este efecto, elevando las temperaturas globales y afectando a nuestro clima.

Los gases de efecto invernadero que provocan este efecto artificial son el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que se produce por la combustión de combustibles fósiles y aunado a la deforestación, que es el medio natural para disminuir el CO<sub>2</sub>, el metano liberado por acción de la agricultura, por animales y vertederos, y el óxido nitroso, provocado por la producción agrícola más una variedad de industrias químicas.

Todos estos gases se definen como gases de efecto de invernadero (GEI) definidos en el protocolo de Kioto así mismo se definió el termino CO<sub>2</sub>(e) que es utilizado como equivalente de todos los gases de efecto invernadero (Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) – Potencial de calentamiento PC=1, Metano (CH<sub>4</sub>) PC= 21, Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O) PC= 292, Carburos Hidrofluorados (HFC) PC= 11,700, Perfluorados (PFC) PC= 6,700, Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) PC= 23,000), definidos en el protocolo de Kioto en 1997 <sup>(5)</sup>.

Como resultado, el cambio climático está ya afectando al planeta y consecuentemente a nuestra vida diaria y aún más, se pronostica que sus efectos adversos se incrementen en los próximos años provocando inundaciones, destrucción de ecosistemas y consecuentemente la desaparición de especies en las próximas décadas.

Se espera un incremento de la temperatura mundial durante los próximos cien años de hasta 5,8° Celsius, un aumento mucho más rápido que el experimentado hasta ahora en la historia de la humanidad <sup>(6)</sup>. Derivado de lo anterior y por supervivencia de las especies y de la vida tal como la conocemos, el objetivo de la política medioambiental deberá ser el mantenimiento riguroso de la subida de la temperatura global en menos de 2°C ya que a un incremento superior se producirá un aumento dramático de los daños a los ecosistemas y desastres naturales.

<sup>4</sup> Revolución Energética, Perspectiva Mundial de la Energía Renovable. Greenpeace Internacional, Consejo Europeo de Energías Renovables (EREC), Enero 2007.

<sup>5</sup> Martínez, Julia, Fernández Adrián. Cambio climático: una visión desde México. Secretaría de Medio Ambiente, INE, 2004

<sup>6</sup> Revolución Energética, Op. Cit., p. 17

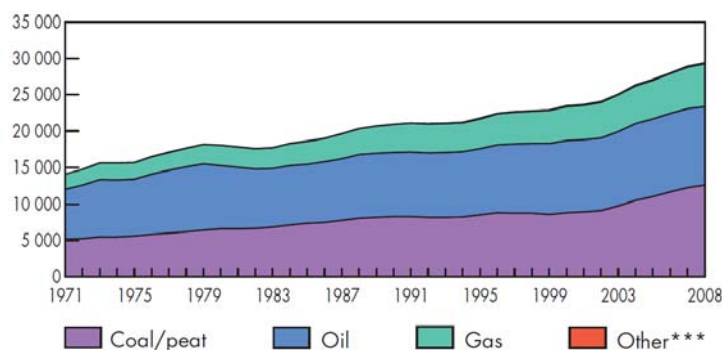
La figura 1.1 ilustra el efecto de invernadero que se presenta por la emisión de gases contaminantes a la atmosfera y la tabla muestra el incremento de temperatura media anual que se ha observado en los últimos años.



Figura 1.1 Efecto de invernadero e incremento de temperatura media anual en los últimos años

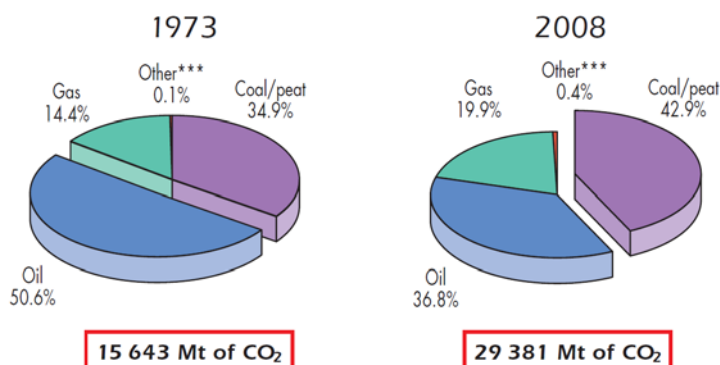
Fuente: Revolución Energética. Greenpeace y EREC, Enero 2007.

La grafica 1.16 y 1.17 muestran el incremento en la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmosfera, se observa que de 1971 a 2008 se incrementó de 15,000 a 30,000 Mt, es decir en 100 % solo en 35 años.



Gráfica 1.16 Incremento de la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmosfera de 1971 a 2008, en millones de toneladas (Mt)

Fuente: KWES, IEA, 2010



Gráfica 1.17 Incremento de la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmosfera de 1971 a 2008.

Fuente: KWES, IEA, 2010

### 1.2.3 Revolución Energética

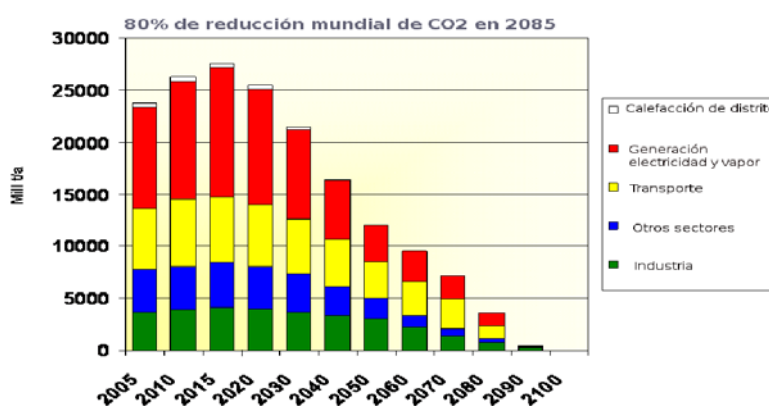
Derivado del uso intensivo de los combustibles fósiles el cual provoca la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera se ha desencadenado un cambio climático mundial que está afectando ya a los ecosistemas. “Un calentamiento global medio que alcance los 2°C es una amenaza para millones de personas y conlleva un riesgo creciente de hambrunas, malaria, inundaciones y sequías”<sup>(7)</sup>. Se requiere entonces mantener el aumento de la temperatura dentro de unos límites aceptables. Para ello se deben reducir sustancialmente las emisiones de gases de efecto invernadero.

En base a lo anterior se requiere un cambio de dirección en el uso de los recursos energéticos disponibles y el desarrollo de nuevas fuentes de energía que respeten el medio ambiente y sean sostenibles en este concepto.

“Greenpeace y Consejo Europeo de Energías Renovables (EREC) estudian, en su informe anual, dos escenarios para 2050. En primer lugar el Escenario de Referencia, que se basa en el publicado por la Agencia Internacional de la Energía (AIE) en el World Energy Outlook 2007, extrapolado a partir de 2030. En segundo lugar un Escenario de Revolución Energética propuesto que ofrece un objetivo de reducción del 50% de las emisiones de dióxido de carbono en el mundo para el año 2050 en comparación con los niveles de 1990, con una reducción de las emisiones per cápita a menos de 1,3 toneladas por año para que el aumento de la temperatura global no supere los 2°C”<sup>(7)</sup>.

Según Greenpeace y EREC si no se toman medidas se espera que en 2050 las emisiones de CO<sub>2</sub> alcancen 46000 Mt/año, el doble respecto a 2003, con lo cual estaríamos ya muy lejos de revertir los efectos del calentamiento global. Sin embargo bajo el escenario de revolución energética propuesto, se pretende reducir de 23000 Mt/año en 2003 a 12000 Mt/año en 2050 con lo cual las emisiones per cápita se reducen de 4 t/año a 1.3 t/año.

Para la aplicación de este plan es necesario el compromiso de todas las naciones y en particular de las más industrializadas para impulsar el desarrollo de las energías limpias y que conlleven a una disminución de los costos de producción que le permitan competir con los combustibles fósiles, pero más aún un cambio de conciencia mediante el cual se toma la dimensión del daño al medio ambiente y a nuestro planeta y por consecuencia a la humanidad misma y que se materialicen acciones para hacer una realidad la Revolución Energética que permita cambiar nuestra forma de vida y nuestras fuentes energéticas. La grafica 1.18 muestra la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el escenario propuesto por Greenpeace y EREC.



Gráfica 1.18 Emisiones de CO<sub>2</sub> en el escenario de revolución energética (Mt/año)

Fuente: Revolución Energética. Greenpeace y EREC, Enero 2007.

<sup>7</sup> Revolución Energética, Op. Cit., p. 14

### 1.2.4 Energías renovables

Derivado del escenario geopolítico internacional y de la disminución, cada vez más marcada, de las reservas mundiales de hidrocarburos y el incremento en los costos de extracción, el precio del petróleo se ve afectado considerablemente, teniendo en los últimos años el incremento más significativo, debido a esto la seguridad en el suministro energético se ha convertido en el tema más importante de la agenda política.

Las energías renovables como la eólica, la biomasa, la fotovoltaica, la termosolar, la geotérmica, maremotriz y la hidroeléctrica están tomando cada vez más madurez técnica y consecuentemente se tornan más rentables a la vez que compiten con las energías tradicionales. En este contexto la energía eólica ofrece opciones cada vez más atractivas. Todas las energías alternas o limpias tienen en común que producen cantidades muy pequeñas o nulas de gases de efecto invernadero y se basan en fuentes naturales prácticamente inagotables. Aunado al desarrollo de las energía renovables y la gradual sustitución de los combustibles fósiles también existe la opción de hacer más eficientes nuestro proceso de generación y consumo de energía con lo cual se reduce considerablemente los recursos utilizados en generarla y la cantidad de energía consumida.

Según datos del EREC del 2004, las fuentes de energía renovable abastecen el 13% de la demanda energética primaria mundial y para 2050 pueden llegar a abastecer hasta el 48% si se aplican las medidas necesarias y para Europa pueden llegar a 45% para el 2030 según un estudio del Consejo Europeo de Energías Renovables <sup>(8)</sup>.

El Escenario de Revolución Energética de Greenpeace y EREC, describe una ruta de desarrollo que transforma la situación actual en un suministro energético sostenible aplicando las siguientes medidas:

- Mejorando la **eficiencia energética** se podría garantizar una disminución de la demanda de energías primarias de la cifra actual de 474.900 PJ/a (Peta Julios por año) (2005) a 478.420 PJ/a para 2050 <sup>(9)</sup>, comparado con la cantidad de 867.600 PJ/a en un Escenario de Referencia.
- Se debe garantizar que para el año 2050, alrededor del 77% de la electricidad se producirá a partir de fuentes de energía renovable (incluyendo las grandes centrales hidroeléctricas). De la misma manera para 2050, el 56% de la demanda de energía primaria será cubierta por fuentes de energía renovable.

“Por otra parte, las reservas de energías renovables técnicamente accesibles en todo el mundo son suficientemente grandes como para poder proporcionar hasta seis veces más de la energía que se consume actualmente en el mundo y para siempre” <sup>(9)</sup>. La figura 1.2 siguiente ilustra lo anterior.

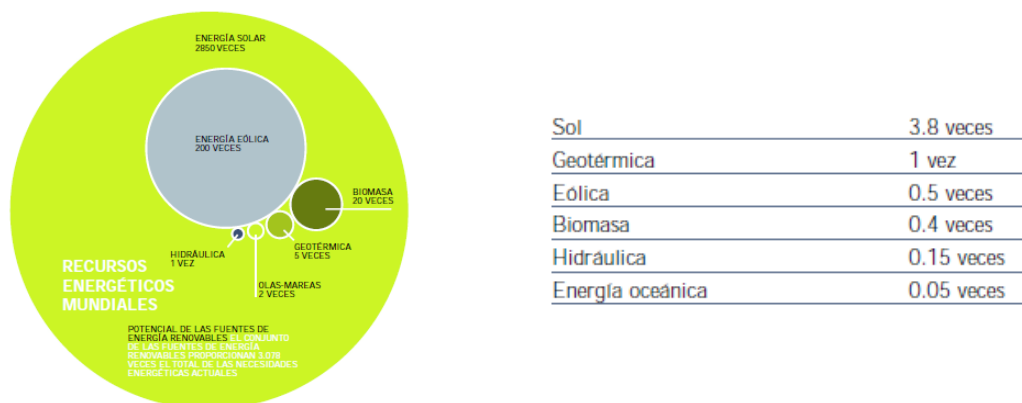


Figura 1.2. Ilustra el potencial energético de las fuentes de energía renovables. Fuente: Revolución Energética, Greenpeace y EREC, Enero 2007.



En la tabla 1.2 se muestra el crecimiento de las energías renovables en los últimos años y la proyección para la Unión Europea al 2020. Los datos mostrados difieren de otras fuentes de información, sin embargo lo interesante es el porcentaje de crecimiento anual que se muestra, posicionando a la energía eólica como una de las más atractivas en el ámbito de las energías renovables.

Capacidad Instalada de los tipos de Energías Renovables en la Unión Europea				
Tipo de Energía	2006	2010	2020	Crecimiento Anual 2010 – 2020
Eólica	47.7 GW	80 GW	180 GW	8.5%
Hidráulica	106.1 GW	111 GW	120 GW	0.8%
Solar	3.2 GW	18 GW	150 GW	23.6%
Bioenergética	22.3 GW	30 GW	50 GW	5.2%
Geotérmica	0.7 GW	1 GW	4 GW	14.9%

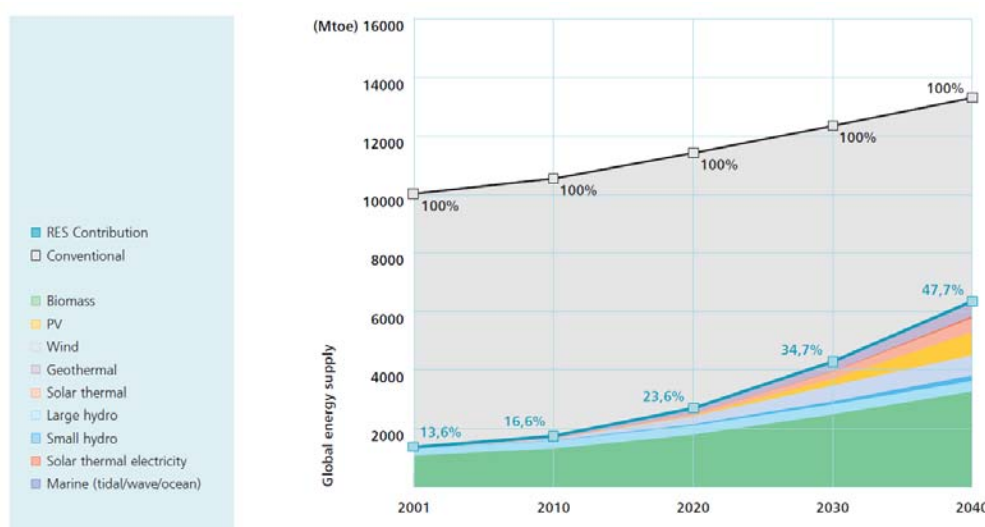
Tabla 1.2. Crecimiento de las energías renovables para la Unión Europea al 2020. Fuente: European Renewable Energy Council, 2004

La tabla 1.3 y la gráfica 1.16 muestra la perspectiva mundial de las energías renovables al 2040, se observa una aportación del 48% anual del total de energía consumida para 2040.

	2001	2010	2020	2030	2040
Total Consumption in Mtoe (IIASA)	10038,3	10549	11425	12352	13310
Biomass	1080	1313	1791	2483	3271
Large hydro	222,7	266	309	341	358
Small hydro	9,5	19	49	106	189
Wind	4,7	44	266	542	688
PV	0,2	2	24	221	784
Solar thermal	4,1	15	66	244	480
Solar thermal electricity	0,1	0,4	3	16	68
Geothermal	43,2	86	186	333	493
Marine (tidal/wave/ocean)	0,05	0,1	0,4	3	20
Total RES	1364,5	1745,5	2694,4	4289	6351
RES Contribution	13,6%	16,6%	23,6%	34,7%	47,7%

Tabla 1.3. Perspectiva de las energías renovables al 2040 en miles de toneladas de petróleo crudo equivalente (Mtoe)

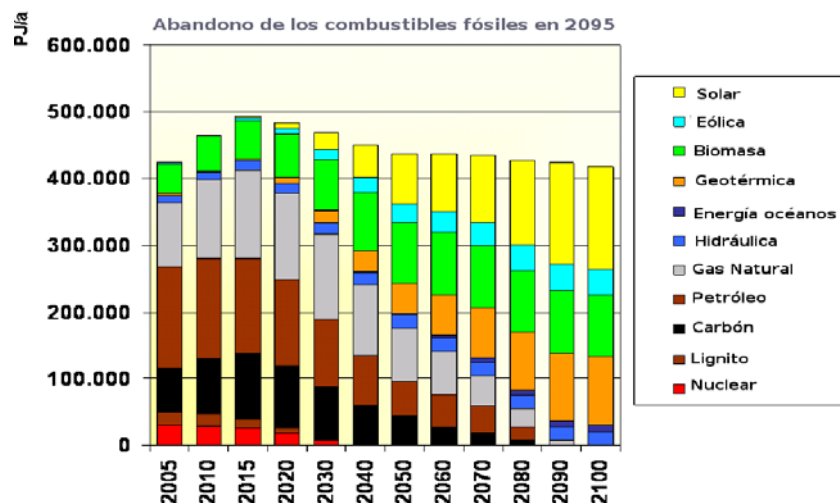
Fuente: Renewable Energy Scenario to 2040. European Renewable Energy Council, Mayo 2004



Gráfica 1.16 Perspectiva de las energías renovables al 2040.

Fuente: Renewable Energy Scenario to 2040. European Renewable Energy Council, Mayo 2004

La gráfica 1.20 muestra el pronóstico para la demanda de energía primaria para el escenario de revolución energética propuesto por Greenpeace Internacional y EREC. En comparación con la tabla 1.2, aquí se muestra la proyección de la participación, en el ámbito energético, de las energías renovables y una vez más a la energía eólica como una de las de mayor crecimiento.



Gráfica 1.20 Demanda de energía primaria en el escenario de revolución energética

Fuente: Revolución Energética. Greenpeace y EREC, Enero 2007.

Después de haber analizado el panorama general de los energéticos y las razones por las cuales es necesario un cambio de dirección, desde el punto de vista energético, analizaremos las proyecciones en cuanto a energía eólica y la perspectiva para las próximas décadas.

### 1.3 Perspectivas de la Energía Eólica

De las energías renovables, la eólica una de las más desarrolladas a nivel mundial y de las que más futuro tienen para posicionarse en los primeros lugares como fuente de energía alterna y limpia, el uso básicamente es para la generación de energía eléctrica mediante la conversión de la energía del viento.

Estudios independientes de varios estados miembros de la Unión Europea sugieren que la energía eólica puede proveer alrededor del 20 % de la generación de electricidad, con la estructura actual de transmisión y distribución.

Las centrales eólicas ofrecen, desde el punto de vista ambiental, varias ventajas comparativas sobre las centrales térmicas convencionales que utilizan carbón, derivados del petróleo o gas natural. No utilizan combustibles, no emiten contaminantes del aire ni gases de efecto invernadero, ni producen residuos tóxicos o consumen agua o recursos naturales escasos. Asimismo, en comparación con las centrales nucleares, la energía eólica no genera ningún residuo peligroso, ni presenta riesgos de accidentes en gran escala.

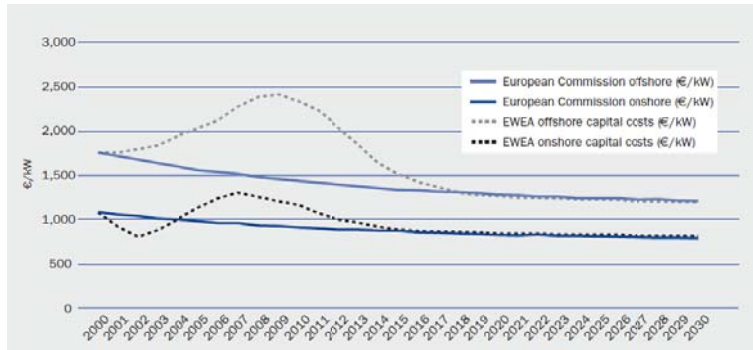
El costo de producción de electricidad por la energía eólica en Europa ha disminuido en los últimos 15 años aproximadamente en un 80%. Estas reducciones de costo tan importantes se han conseguido gracias al desarrollo de turbinas eólicas más seguras, más eficientes y más baratas, en combinación con la producción

<sup>8</sup> 45 % By 2030, Towards a truly sustainable energy system in the EU. Consejo Europeo de Energías Renovables, Mayo 2011

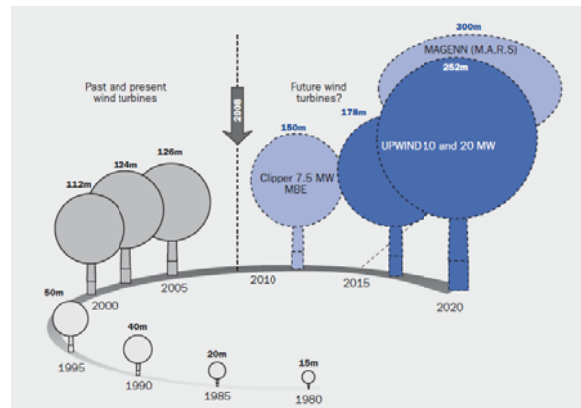
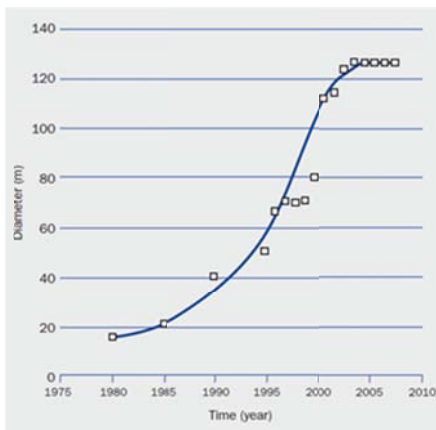
<sup>9</sup> Revolución Energética, Op. Cit., p. 60

de turbinas más grandes y con una expansión del mercado. Durante los últimos diez años, el precio de las turbinas eólicas ha disminuido en un 5% cada año, mientras que al mismo tiempo el rendimiento ha aumentado en un 30%. Otra circunstancia es el aumento de capacidad de las máquinas, que se ha multiplicado por un factor de 10 en los últimos diez años.

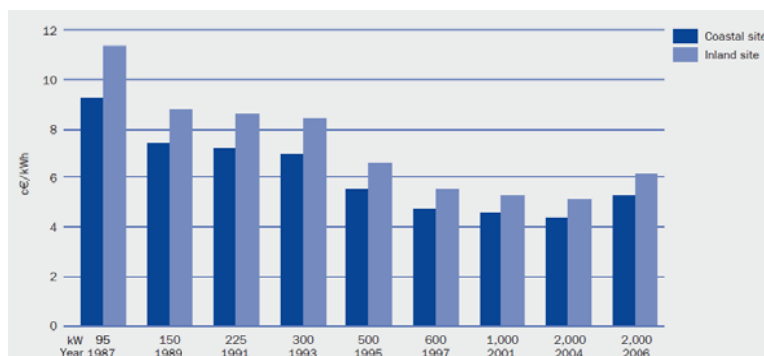
La grafica 1.21 ilustra cómo ha disminuido el costo de la energía eólica en Euros por Kw instalado, la gráfica 1.22 muestra la evolución en el tamaño de los rotores de las turbinas eólicas y la gráfica 1.23 muestra la disminución del costo de generación en centavos de euro por Kwh respecto al tamaño de la turbina eólica.



Grafica 1.21 Costo historico de la energía eolica Euros por Kw instalado



Grafica 1.22 Evolución en el tamaño de los rotores de las turbinas eolicas



Grafica 1.23 Disminución del precio de la energía eolica en c€/kwh

Fuente: The Economics of Wind Energy, 2009. A report by the European Wind Energy Association

La necesidad de producir energía limpia será un gran impulsor de la energía eólica, pues si se compara con las mismas cantidades de energía producida por una fuente que utiliza combustible fósil, la reducción de emisión de gas de carbono es total. Con la ratificación del Protocolo de Kyoto, la generación de energía por fuente eólica se podrá beneficiar fuertemente con la emisión de los bonos de carbono, cuyos valores pueden llegar a ser muy significativos, contribuyendo así a mejorar el rendimiento económico de los proyectos eólicos.

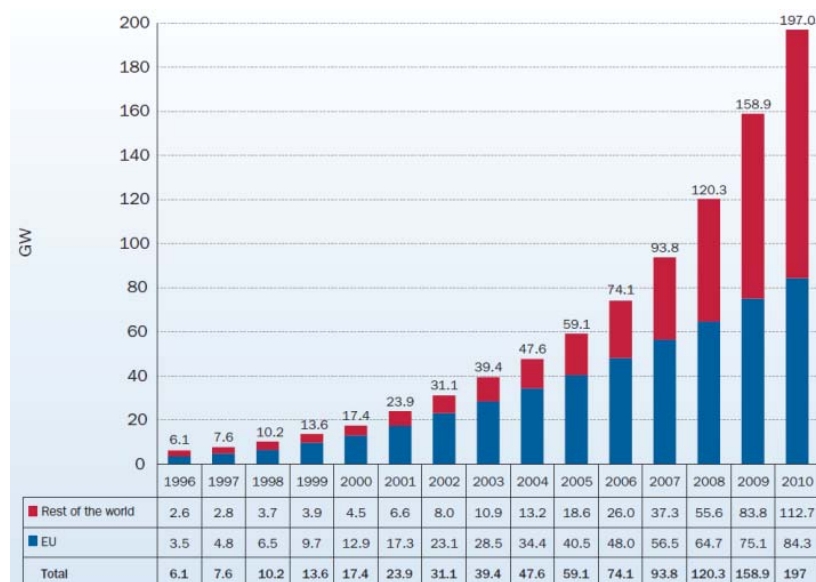
Además de que la rentabilidad de los proyectos de energía eólica cada vez es más atractiva y es una fuente de energía limpia, otra razón de peso, es que se vuelve estratégico que los países aseguren el suministro energético o la llamada “seguridad energética” por esta razón los países que no cuentan con reservas de petróleo que les aseguren el suministro energético futuro, están invirtiendo fuertes cantidades para el desarrollo e implantación de esta energía.

Sin embargo los países productores de petróleo no pueden dejar de lado a las energías renovables, ya que como sabemos los hidrocarburos son finitos y en un momento dado se agotaran dejando a los países sin fuentes de energía sostenibles.

### 1.3.1 Situación actual y proyecciones

En los últimos diez años la capacidad instalada mundial en materia de energía eólica ha crecido en forma exponencial, de 7,480 MW en 1997 a más de 215 GW en junio de 2011 (solamente en los primeros 6 meses de 2001 fueron añadidos 18.41 GW, 15% más que en la primera mitad de 2010)<sup>(10)</sup>.

La capacidad mundial de generación de energía eólica se ha venido duplicando cada 3.5 años desde 1990. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), se trata de una industria que hoy capta el 43% de la inversión en el sector eléctrico mundial y crece a un ritmo de entre 20% y 30% al año. Actualmente se cuenta con una capacidad instalada de 196 GW y se espera que finales del 2011 aumente a 240 GW, ver gráfica 1.24.



Gráfica 1.24 Capacidad mundial instalada de energía eólica.

Fuente: Pure Power. Wind energy targets for 2020 and 2030 A report by the European Wind Energy Association, 2011

<sup>10</sup> Half-year Report 2011. The World Wind Energy Association

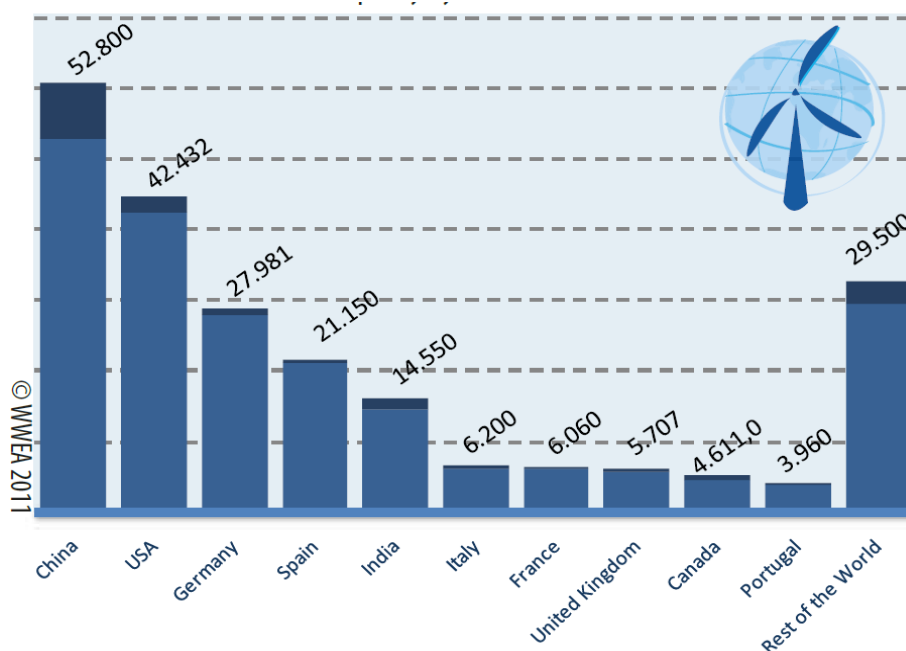
Según datos de la World Wind Energy Association WWEA de finales del 2010, actualmente la energía eólica produjo 430 TWh de energía al año y representa el 2.5% del total mundial en la generación de electricidad.

La tabla 1.4 y la gráfica 1.25 muestran los datos más actuales en cuanto a capacidad de generación de energía eólica por país.

Position	Country	Total Capacity by June 2011 [MW]	Added Capacity first half 2011 [MW]	Total Capacity end 2010 [MW]	Added Capacity first half 2010 [MW]	Total Capacity end 2009 [MW]
1	China	52.800	8.000	44.733	7.800	25.810
2	USA	42.432	2.252	40.180	1.200	35.159
3	Germany	27.981	766	27.215	660	25.777
4	Spain	21.150	480	20.676	400	19.149
5	India	14.550	1.480	13.065	1.200	11.807
6	Italy	6.200	460	5.797	450	4.850
7	France	6.060	400	5.660	500	4.574
8	United Kingdom	5.707	504	5.203	500	4.092
9	Canada	4.611	603	4.008	310	3.319
10	Portugal	3.960	260	3.702	230	3.357
	Rest of the World	29.500	3.200	26.441	2.750	21.872
	<b>Total</b>	<b>215.000</b>	<b>18.405</b>	<b>196.682</b>	<b>16.000</b>	<b>159.766</b>

Tabla 1.4. Capacidad actual de generación de energía eólica.

Fuente: Half-year Report 2011. The World Wind Energy Association



Grafica 1.25 Capacidad actual de generación de energía eólica.

Fuente: Half-year Report 2011. The World Wind Energy Association

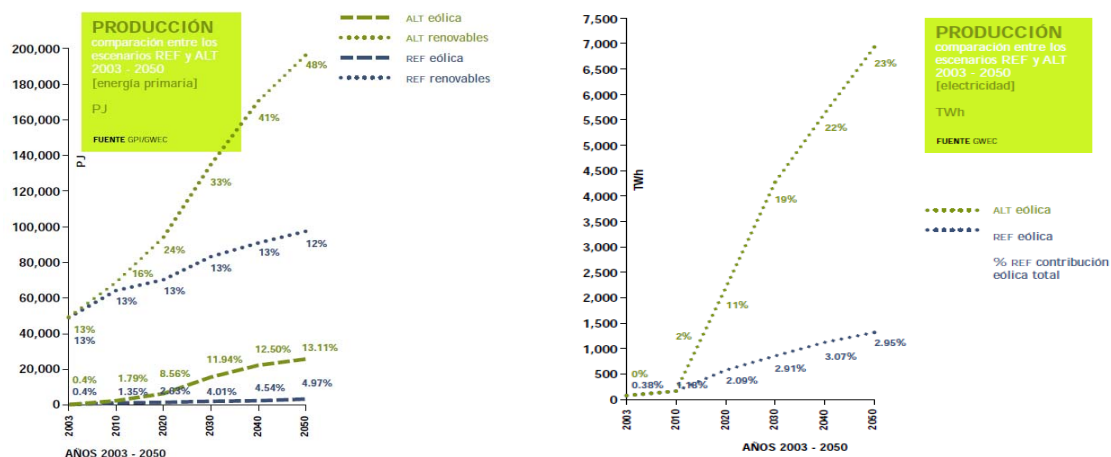
En la Tabla 1.5 se presentan los casos más sobresalientes de crecimiento de algunos países seleccionados en sus capacidades de generación eólica en este periodo, de aquí, se puede observar que todos los países analizados crecieron arriba del promedio mundial total que fue del 29% entre 2007 y 2008.

Lugar 2008	País	2008	2008	Incremento 2008 %	2007	2006	2005
1	Estados Unidos	<b>25,170.0</b>	8,351.2	49.7	16,818.8	11,603.3	9,149.0
4	China	<b>12,210.0</b>	6,298.0	106.5	5,912.0	2,599.0	1,266.0
6	Italia	<b>3,736.0</b>	1,009.9	37.0	2,726.1	2,123.4	1,718.3
7	Francia	<b>3,404.0</b>	949.0	38.7	2,455.0	1,567.0	757.2
8	Gran Bretaña	<b>3,287.9</b>	898.9	37.6	2,389.0	1,962.9	1,353.0
10	Portugal	<b>2,862.0</b>	732.0	34.4	2,130.0	1,716.0	1,022.0
14	Australia	<b>1,494.0</b>	676.7	82.8	817.3	817.3	579.0
15	Irlanda	<b>1,244.7</b>	439.7	54.6	805.0	746.0	495.2
22	Bélgica	<b>383.6</b>	96.7	33.7	286.9	194.3	167.4
24	Brasil	<b>338.5</b>	91.5	37.0	247.1	236.9	28.6
27	Corea del Sur	<b>278.0</b>	85.9	44.7	192.1	176.3	119.1
28	Bulgaria	<b>157.5</b>	100.6	176.7	56.9	36.0	14.0
31	Hungría	<b>127.0</b>	62.0	95.4	65.0	60.9	17.5
36	Estonia	<b>78.3</b>	19.7	33.6	58.6	33.0	33.0
43	Sudáfrica	<b>21.8</b>	5.2	31.4	16.6	16.6	16.6
	<b>Total Mundial</b>	<b>121,187.9</b>	<b>27,261</b>	<b>29.0</b>	<b>93,926.8</b>	<b>74,150.8</b>	<b>59,024.1</b>

Tabla 1.5 Crecimiento de Generación Eólica Instalada (MW). Países Seleccionados 2005-2008.

Fuente: Base de datos del World Wind Energy Association. 2009

Del estudio de Greenpeace y EREC mencionado en el capítulo anterior se desprende la gráfica 1.26 que muestra la proyección en cuanto a capacidad instalada y generación de energía eléctrica a partir de la eólica en los escenarios de referencia y alterno.



Gráfica 1.26 Proyección de crecimiento de la energía eólica en escenario de referencia y alterno

Fuente: Revolución Energética. Greenpeace y EREC, Enero 2007

Como se mencionó anteriormente la energía eólica tiene un potencial de crecimiento muy importante y esto puede hacerse realidad al aplicarse las políticas adecuadas, de la gráfica anterior se observa que la energía eólica puede llegar a representar hasta el 13% de la demanda global de energía y el 23% respecto a las energías renovables.

En la tabla 1.6 se puede apreciar las perspectivas de crecimiento de la industria eólica son realmente optimistas. La mayoría de los gobiernos tienen metas muy importantes de incremento de la capacidad instalada con este tipo de energéticos, impulsadas por programas y políticas de fomento, en los cuales la mayoría incluyen apoyos tarifarios ya que en este momento los costos asociados a la generación son un poco más elevados con relación a los de la generación mediante combustibles fósiles, situación que se mantendrá mientras no se les carguen las externalidades que se derivan de su quema. No obstante, los bonos de carbono así como los mercados voluntarios y la reducción en los costos de la tecnología, son elementos que coadyuvan a hacer más atractiva la industria eólica.

País	Metas al 2010 de energías renovables %	Tipos de incentivos
Austria	78	CTER*
Dinamarca	29	CTER
Finlandia	31.5	CTER + ayuda en la inversión + crédito fiscal
Francia	21	CTER + subastas
Alemania	12.5	CTER
Grecia	20.1	CTER + ayuda en la inversión + crédito fiscal
Italia	25	Cuota y certificados verdes
Portugal	39	CTER + ayudas a la inversión
España	29.4	CTER
Suecia	60	Cuota y certificados verdes
Holanda	9	CTER + exención ecotasa
Gran Bretaña	10	Cuota y certificados verdes
Japón	7	n.d.
Argentina	2000 MW al 2013	CTER + crédito fiscal
Brasil	14,074 MW 2014	CTER + apoyos en la interconexión
Chile	492 MW al 2010	Apoyos en la interconexión
México	500 MW 2012	CTER + crédito fiscal

Tabla 1.6 Metas de Capacidad de Generación a Instalar e Incentivos para ER. Países Seleccionados

\*CTER: Cuota en Tarifa de Energía Renovable

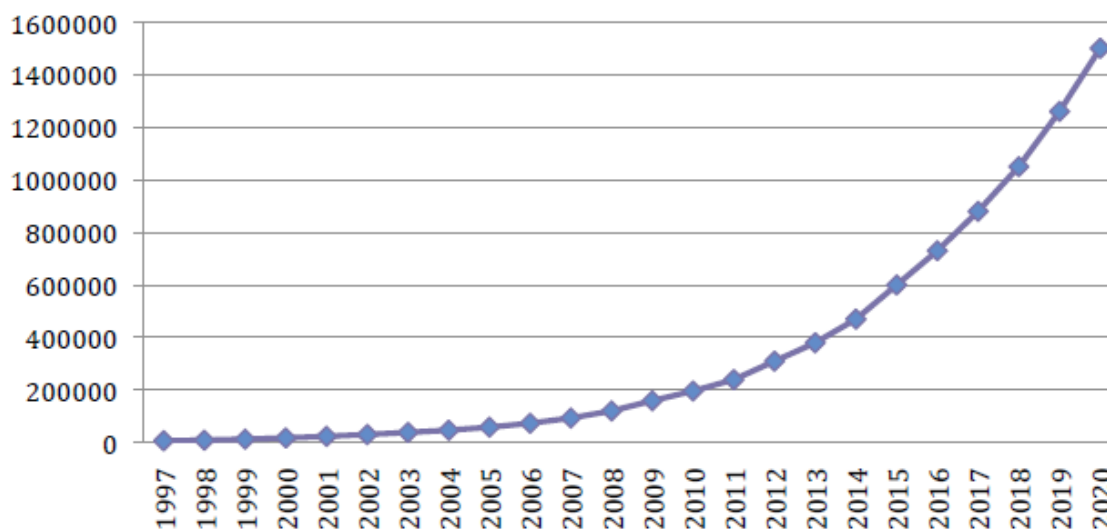
Fuente: Renewable Global Status Report. International Energy Agency, (2006 Update)

Los países más desarrollados han aprendido que la clave del crecimiento de la industria eólica son los incentivos que no deben estar basados en políticas estáticas sino dinámicas que se ajusten a las condiciones del momento y a las necesidades de cada país.

Los países europeos han tenido el mayor número de experiencias en el manejo de incentivos y han hecho importantes desarrollos tecnológicos. Las fábricas más importantes del mundo están en Europa, aunque no es difícil que en los próximos años veamos floreciendo a la industria eólica en América Latina.

La Asociación Mundial de Energía Eólica estima que para el año 2020 la capacidad global de generación a partir de la energía eólica podría alcanzar 1.5 millones de MW instalados. La gráfica 1.27 muestra la proyección en cuanto a capacidad instalada hasta el 2020.





Grafica 1.27 Proyección en la capacidad instalada de energía eólica (MW).

Fuente: World Wind Energy Report, 2010. World Wind Energy Association WWEA, Abril 2011

En cuanto a la emisión de CO<sub>2</sub>(e), datos de la European Wind Energy Association muestran que la energía eólica actualmente evita emitir aproximadamente 300 Mt/año de CO<sub>2</sub> (e), cifra no muy significativa si se considera que actualmente se emiten cerca de 25,000 Mt/año, sin embargo las proyecciones al 2020 implican que incrementara su capacidad en 7.65 veces la actual, lo cual hace pensar que si se cumple esto se podría dejar de emitir en 2020 cerca de 2300 Mt/año, es decir un 9% del total.

## 1.4 La Energía Eólica en México

### 1.4.1 El panorama en México de la industria eólica

México se ha caracterizado por ser un país netamente petrolero durante todo su desarrollo económico, lo anterior derivado de su gran potencial y abundantes recursos de hidrocarburos. Sin embargo las proyecciones en cuanto a sus reservas de petróleo y gas no son muy alentadoras, de tal manera que de no tomar acciones para dejar parcialmente la dependencia de los combustibles fósiles, México se podría ver envuelto en una crisis energética que afectaría su desarrollo futuro.

En 2009 se publicó la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, a partir de esta, se publicó el Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables que busca impulsar el desarrollo de la industria de energías renovables en México.

La transición energética consiste en cambiar el enfoque del sector energético generando un mejor aprovechamiento de los combustibles fósiles y fomentando el uso de tecnologías limpias a través de la energía renovable y la eficiencia energética. Con lo cual México se alinea al programa de Revolución Energética de Greenpeace Internacional y El Consejo Europeo de Energías Renovables (EREC).

Sin embargo aunque se han iniciado a tomar acciones para el desarrollo de las energías renovables, aún no son suficientes. Lo anterior se visualiza en la tabla 1.7, la cual muestra la capacidad de generación por fuente en México, se observa que las energías renovables participan con un 3.9% y la energía eólica con un 0.1% del total en la generación de energía eléctrica.

Capacidad de Generación Eléctrica en México por Tipo de Energía				
Tecnología	CAPACIDAD 2008**		GENERACIÓN 2008	
	Anual (MW)	% Total	Anual (GWh)	% Total
Eólica	85.25	0.1%	231.51	0.1%
Hidroeléctrica*	376.95	0.6%	1,590.57	0.6%
Geotérmica	964.5	1.7%	7,057.77	2.9%
Biomasa y biogás*	498.11	0.9%	819.35	0.3%
Total	1,924.82	3.3%	9,699.18	3.9%
Total servicio público y permisionarios	58,105.54	100%	246,785	100.0%

Tabla 1.7 Capacidad de Generación Eléctrica en México por Tipo de Energía

\*Incluyen proyectos híbridos, \*\*Proyectos en operación al cierre del 2008

Fuente: Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables, Agosto de 2009. Secretaría de Energía

#### 1.4.2 El recurso eólico de México

Actualmente, México tiene información anemométrica recabada tanto por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) y de Laboratorios Nacionales de Energía Renovable de Estados Unidos (NREL). La tabla 1.8 muestra los lugares donde se tiene información de velocidad del viento.

Estado	Sitios con información
Baja California	Laguneros y Vizcaíno (CFE), Región Pacífico Norte, San Bartolo, Rancho Mar Azul
Campeche	Isla del Carmen (IIE)
Coahuila	Valle del Hundido y Valle de Acatitla (IIE)
Estado de México	Valle de México (IIE)
Hidalgo	El Gavillero y Pachuca (IIE)
Oaxaca	La Ventosa (CFE, IIE)
Quintana Roo	Puerto Juárez, Cancún, Cozumel, Puerto Morelos, Chemuyil, Coba y Xcalak (IE + SNL)
Veracruz	Laguna Verde (IIE, CFE), Lerdo y Acayucan (CFE)
Zacatecas	Cerro de la Virgen (IIE)

Tabla 1.8 Sitios en México con datos de viento. Fuente: Elementos para la Promoción de la Energía Eólica en México, 2009

#### Sitios con potencial eólico en México

Los potenciales del recurso varían según la fuente: NREL ha estimado que tan sólo en el Istmo de Tehuantepec existe un potencial de capacidad aprovechable cercano a los 35 mil MW, en tanto que el IIE, con una visión más moderada, afirma que la capacidad en esa zona es de 5 mil MW. Por su parte, el Centro de Investigación en Energía de la Universidad Nacional Autónoma de México (CIE-UNAM) afirma que el potencial es de 2 mil MW de acuerdo con las zonas más estudiadas. Por su parte la Comisión Reguladora de Energía (CRE) ha estimado que el potencial en esa zona de Oaxaca es superior a los 10 mil MW.

Los sitios identificados a nivel nacional que cuentan con potenciales destacados en materia del recurso eólico, son los siguientes: La Rumorosa en Baja California, la zona de Guerrero Negro en Baja California Sur, el Cerro de la Virgen en Zacatecas, la costa de Tamaulipas, la zona de Campeche, el Istmo de Tehuantepec y la Península de Yucatán. Sin embargo, actualmente se sabe que gran parte del litoral mexicano cuenta con recurso eólico aprovechable.

NREL ha desarrollado una serie de mapas de vientos de algunos estados del país. El más completo de todos es el que se refiere a Oaxaca, pero también tiene los correspondientes a Yucatán, Quintana Roo, Baja California y Campeche.

## Cronología de los principales proyectos eólicos

En lo que concierne exclusivamente a energía eólica, de acuerdo con el estudio comentado se observa que en México se han desarrollado proyectos de importancia relativa aunque pioneros en este tipo de generación, la mayoría casi siempre ligados a actividades productivas. En la Tabla 1.9 se destacan algunos de los más conocidos:

Año	Proyecto	Capacidad Instalada (kW)
1992	Xcalack, Quintana Roo	60.0
1993	Rancho Salinas, Oaxaca	10.0
1993	Isla Arenas, Campeche	3.0
1994	Central Eólica La Venta I, Oaxaca	1,575.0
1995	El Gavillero, Hidalgo	2.0
1996	Rancho Minerva, Oaxaca	1.5
1996	Costa de Cocos, Quintana Roo	7.5
1997	Puerto Alcatraz, Isla Santa Margarita, B.C.S.	10.0
1998	Central Eólica Guerrero Negro, B.C.S.	600.0
1999	San Juanico, B.C.S.	100.0
2007	Central Eólica La Venta II	85,000.0
2009	La Rumorosa	10,000

Tabla 1.9 Sinopsis de la cronología de los principales proyectos eólicos en México

Fuente: Elementos para la Promoción de la Energía Eólica en México, 2009

La mayoría de los proyectos fueron instalados en zonas con potenciales importantes de recurso eólico, plenamente identificadas pero sin un registro completo y detallado de las capacidades de las distintas clases de viento, solamente se tiene registro en los lugares donde se instalaron mediciones anemométricas.

### 1.4.3 Capacidad de generación eólica

#### Situación actual

México es un país que pese a ser integrante de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), organismo que reúne a las principales potencias económicas a nivel mundial, tiene un nivel de rezago considerable en el campo del aprovechamiento de las fuentes alternas de energía.

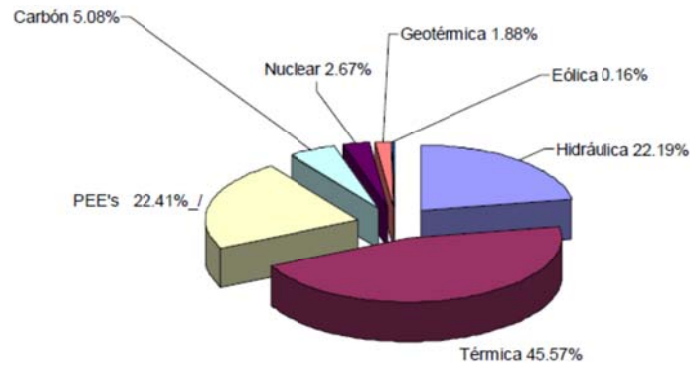
Años	Hidroeléctrica	Termoeléctrica	*PEE's	Carbón	Nuclear	Geotérmica	Eólica	T o t a l
1999	9,618	21,327	0	2,600	1,368	750	2	35,666
2000	9,619	21,772	484	2,600	1,365	855	2	36,697
2001	9,619	22,639	1,455	2,600	1,365	838	2	38,519
2002	9,615	23,264	3,495	2,600	1,365	843	2	41,184
2003	9,615	23,264	6,756	2,600	1,365	960	2	44,561
2004	10,530	23,830	7,265	2,600	1,365	960	2	46,552
2005	10,536	22,820	8,251	2,600	1,365	960	2	46,533
2006	10,566	23,017	10,387	2,600	1,365	960	2	48,897
2007	11,343	23,218	11,457	2,600	1,365	960	85	51,029
2008	11,343	23,291	11,457	2,600	1,365	965	85	51,105

Tabla 1.10. México. Capacidad Instalada de Generación Eléctrica por Fuente (MW), 1999-2008.

Fuente: México, Secretaría de Energía

\*PEE's: Productor Externo de Energía

Su balance energético a finales del año 2008 deja en claro que este tipo de fuentes ocupan un lugar marginal en la capacidad de generación pues, si se excluye la fuente hidroeléctrica de gran escala, la capacidad instalada sólo representa el 3.3% (equivalente a 1925 MW) del total registrado de 51,105 MW, como se puede observar en la Tabla 1.10 y Gráfica 1.28.



Gráfica 1.28 México. Capacidad Instalada de Generación Eléctrica, 2008.

Fuente: Secretaría de Energía. Estadísticas de Energía, 2009

Cuando nos remitimos a la energía eólica como fuente de generación de electricidad, la cifra se minimiza debido a que durante casi diez años se mantuvo una capacidad instalada de 2 MW y no fue sino hasta el año 2007 cuando se comenzó a ampliar esta capacidad a 85 MW y a 250 MW en 2009, debido fundamentalmente a los proyectos de La Venta en Oaxaca. En la figura 1.3 se muestra un mapa de la República Mexicana con los principales proyectos eólicos instalados al 2007 y los sitios potenciales según los estudios actuales.



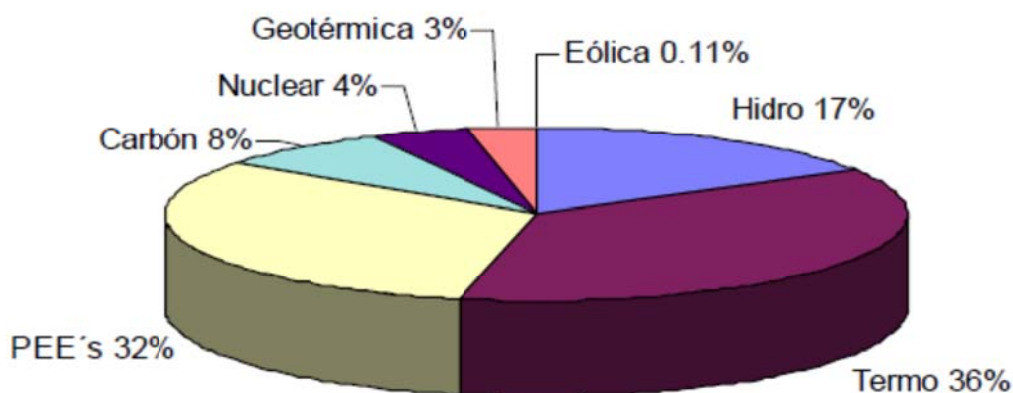
Figura 1.3. Distribución geográfica del recurso potencial eólico. Fuente: Comisión Federal de Electricidad.

De acuerdo con los datos emitidos por la Secretaría de Energía, durante el periodo 1999-2008 la generación eólica creció en forma por demás significativa, al pasar de 6 GWh registrados en 1999 a 255 GWh en 2008; es decir, hubo un crecimiento del 4,000% (Tabla 1.11). Sin embargo, este crecimiento no es significativo en relación a la participación del resto de las fuentes, pues en el último año sólo representó el 0.16 % del total generado (Gráfica 1.29), a pesar de que con respecto a la capacidad instalada de generación, dicha fuente significó el 0.16%.

Años	Hidroeléctrica	Termoeléctrica	PEE's	Carbón	Nuclear	Geotérmica	Eólica	T o t a l
2000	33,075	125,525	1,295	18,696	8,221	5,901	8	192,721
2001	28,435	131,215	4,590	18,567	8,726	5,567	7	197,106
2002	24,862	122,345	21,852	16,152	9,747	5,398	7	200,362
2003	19,753	117,722	31,645	16,681	10,502	6,282	5	202,590
2004	25,076	102,428	45,855	17,883	9,194	6,577	6	207,019
2005	27,611	107,501	45,559	18,380	10,805	7,299	5	217,160
2006	30,305	98,308	59,428	17,931	10,866	6,685	45	223,568
2007	27,042	96,729	70,982	18,101	10,421	7,404	248	230,927
2008	38,892	86,069	74,232	17,789	9,804	7,056	255	234,096

Tabla 1.11 México. Generación Eléctrica por fuente (GWh), 1999-2008

Fuente: Secretaría de Energía, Estadísticas de Energía, 2009



Gráfica 1.29 México. Generación bruta de electricidad por fuente, 2008.

Fuente: Secretaría de Energía, Estadísticas de Energía, 2009

Esta situación de rezago en materia de desarrollo y aprovechamiento de las fuentes alternas de energía en nuestro país nos obliga a replantear el futuro energético de México, sobre todo considerando el potencial que existe, tanto en materia de aprovechamiento solar como eólico y más aún ante una escenario incierto en lo que toca a las energías convencionales como los hidrocarburos cuyas reservas probadas disminuyen cada día y el enorme potencial en aguas profundas no se han confirmado aún.

Aun así, en caso de que México llegara a confirmar estas reservas, es necesario un cambio de dirección y apostar a las energías renovables para asegurar el futuro energético de la Nación.

## Potencial de generación eólica en México

CFE tiene proyectado instalar seis centrales de generación con una capacidad total de 585 MW. La CRE, hasta el año 2006, había otorgado permisos para autoabastecimiento por un total de 700 MW, más 360 MW en la zona de La Rumorosa en Baja California, y afirma que la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE) se ha manifestado interesada en instalar en Oaxaca un total de 3,200 MW durante los próximos diez años.

Hace sólo una década, la CFE y el Instituto de Investigaciones Eléctricas reportaban un potencial eólico de generación de entre 3,000 y 5,000 MW que representa alrededor del 14% de la capacidad total de generación eléctrica instalada actualmente en todo México, estudios del 2008 de la CFE reportan un potencial eólico de 7000 MW.

Las zonas con el mayor potencial eólico se ubican en la región del Istmo de Tehuantepec, en Oaxaca, en la parte correspondiente a la costa del Pacífico, así como en sitios en los estados de Baja California Sur, Coahuila, Hidalgo, Quintana Roo y Zacatecas <sup>(11)</sup>, sin embargo, se requieren de estudios actualizados para conocer con más exactitud el potencial eólico de México.

### 1.5 Aspectos ambientales y ecológicos de la Energía Eólica

La energía eólica tiene muchas ventajas ambientales. Es limpia, renovable y un medio de generación sustentable. Sin embargo también presenta algunas desventajas como los llamados impactos ambientales derivados de su aprovechamiento, estos son los factores visuales y paisajista, ruido e interferencia electromagnética. Otros factores son los efectos sobre la ecología, en este contexto, abarca todos los efectos materiales sobre la flora y la fauna. Corrientemente incluye efecto sobre los pájaros, sobre tipos de vegetación no tradicional o rara y cambios sobre la hidrología local.

Todos estos factores deben estudiarse a detalle al momento de planear una central eólica y tratar de minimizarlos a fin de afectar lo menos posible al ambiente del lugar.

#### Efectos ambientales y ecológicos

Los efectos ambientales locales de la energía eólica se diferencian entre aspectos que afectan la percepción o el comportamiento humano y aquellos que afectan la ecología. Entre los primeros están el uso de la tierra, el impacto visual, el ruido, las interferencias electromagnéticas, la salud y seguridad y aquellos con implicancias socio económico. Entre los segundos están los efectos sobre la fauna y la flora, la erosión del suelo, la alteración de la calidad del agua y del aire, los desechos sólidos y peligrosos y el consumo de materiales y energía.

En la tabla siguiente se describen los efectos ambientales más importantes y se da una breve descripción de cada uno:

<b>Uso de la tierra</b>	Instalaciones eólicas necesitan de grandes áreas para su instalación, solo usan en forma efectiva una pequeña porción del terreno (1 a 10 %), dejando el resto disponible y compatible con otros usos. se puede emplear para la agricultura o ganadería <sup>(12)</sup> .
<b>Efecto visual</b>	La reacción a la vista de una granja eólica es altamente subjetiva. Se puede ver como un símbolo de bienvenida a una fuente limpia de energía y otras la ven como una adición no deseada al paisaje. La industria ha desarrollado un esfuerzo considerable para integrar cuidadosamente las granjas eólicas con el paisaje.
<b>Ruido</b>	Las turbinas eólicas modernas son bastante silenciosas. Al planificar una granja eólica, se debe prestar cuidado cualquier sonido que pueda ser escuchado desde el exterior de las casas vecinas.
<b>Interferencia</b>	Las turbinas eólicas pueden causar IEM por reflexión de la señal en las palas del rotor. Las señales típicas de

<b>Electromagnética (IEM)</b>	comunicaciones que pueden ser afectadas por IEM incluyen las de estaciones de TV y radio, las comunicaciones de microondas y de telefonía celular, y varias señales de los sistemas de control de navegación y tráfico aéreo. Un diseño cuidadoso de una granja eólica puede eliminar cualquier disturbio al sistema de telecomunicaciones.
<b>Salud pública y seguridad</b>	La salud pública y la seguridad vinculadas con las instalaciones clásicas de generación de electricidad están típicamente relacionadas con la emisión de gases a la atmósfera y con los residuos sólidos y líquidos que son arrojados al suelo o al agua. Los únicos materiales potencialmente tóxicos o peligrosos asociados con la mayoría de las centrales eólicas son las relativamente pequeñas cantidades de aceites lubricantes, fluidos hidráulicos y aislantes utilizados en las turbinas.  Entre los accidentes que pueden significar un tema de seguridad se encuentra el hecho de que una pala de la turbina, o piezas de la misma, se separen del rotor y vuele en la dirección del viento.

Fuente: Elaboración propia

### Efectos sobre la ecología

Una central eólica puede tener efectos directos por destrucción de hábitat y de algunos organismos que se encuentran en él por producción de ruidos o movimientos que afectan el comportamiento de los animales. Para tal problema antes de construir una central eólica se debe elaborar el estudio de impacto ambiental de acuerdo a la normatividad vigente e incluir en el diseño de la planta las medidas de mitigación necesarias y en caso extremo suspender el proyecto si este representa un riesgo para el hábitat.

En la tabla siguiente se describen los efectos ecológicos más importantes y se da una breve descripción de cada uno:

<b>Flora y Fauna</b>	Actividades tales como construcción de caminos o la tala de árboles pueden destruir o alterar el hábitat y permitir el ingreso de especies no deseadas El problema se complica cuando se toma en cuenta que algunos de los lugares potencialmente más atractivos para proyectos eólicos, están ubicados en áreas montañosas remotas que son residencia de muchas especies de plantas y animales. Debido a estas preocupaciones, algunas áreas ecológicamente sensitivas (aunque no estén específicamente protegidas por la legislación vigente) deberían quedar fuera de los límites permitidos para los proyectos eólicos
<b>Aves</b>	Las aves frecuentemente colisionan con las estructuras que ellos tienen dificultad de ver, especialmente líneas de alta tensión, postes y ventanas de edificios. Un estudio realizado con radar en Tjaereborg, en el oeste de Dinamarca, donde hay instalada una turbina de 2 MW con un rotor de 60 m de diámetro, mostró que los pájaros tienden a cambiar su ruta de vuelo entre 100 y 200 m antes de la turbina y pasan por arriba o por el costado a una distancia segura
<b>Otros efectos ecológicos</b>	Efectos sobre otros ecosistemas terrestres resultan principalmente de la actividad de construcción de las centrales eólicas, tales como ocupación del suelo y disturbios hidrológicos. Todos esos factores y las medidas de mitigación requeridas deben ser especificados en el proceso de evaluación del impacto ambiental.

Fuente: Elaboración propia

<sup>11</sup> Elementos para la Promoción de la Energía Eólica en México. PA Government Services, Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional, Marzo 2009

<sup>12</sup> Jaime A. Moragues y Alfredo T. Rapallini. Aspectos Ambientales de la Energía Eólica, 2002.



## Capítulo II. Principios físicos y técnicos de la energía eólica

### 2.1 Antecedentes históricos de la energía eólica

Hasta la aparición de la máquina de vapor en el siglo XIX, la única energía de origen no animal para realización de trabajo mecánico era la proveniente del agua o del viento. La primera y más inmediata forma de aprovechamiento de la energía eólica ha sido desde los tiempos más remotos aplicada a la navegación; las primeras referencias de la utilización de embarcaciones a vela proceden de Egipto y datan del IV o V milenio antes de J.C.

Los molinos de viento existían ya en la más remota antigüedad. Persia, Irak, Egipto y China disponían de máquinas eólicas muchos siglos antes de J.C.; Hammurab I. rey de Babilonia, 17 siglos antes de Cristo, se utilizaron molinos accionados por el viento para regar las llanuras de Mesopotamia y para la molienda del grano. Se trataba de primitivas máquinas eólicas de rotor vertical con varias palas de madera o caña, cuyo movimiento de rotación era comunicado directamente por el eje a las muelas del molino.

Los molinos de viento fueron utilizados en Europa en la Edad Media, comenzando a extenderse por Grecia, Italia y Francia. No se sabe a ciencia cierta cómo se expandió la tecnología eólica hacia el Mediterráneo y Europa. Algunos autores creen que Europa desarrolla su propia tecnología, claramente distinta de la oriental, ya que en Europa se imponen fundamentalmente los molinos de eje horizontal, mientras que los molinos orientales eran de eje vertical<sup>(13)</sup>.

En la tabla siguiente se describen algunos eventos históricos que ayudaron al desarrollo de la tecnología para el aprovechamiento de la energía eólica:

1724	Leopold Jacob proyecta un molino de ocho palas que mueve una bomba de pistón	
1883	Aparece el pequeño multipala americano diseñado por Steward Perry	Este molino, de unos 3 metros de diámetro utilizado para bombeo, ha sido el más vendido de la historia
1892	Aeroturbina danesa de Lacourt	Precursor de los actuales aerogeneradores, máquina capaz de desarrollar entre 5 y 25 kW
1900	Se desarrolla la teoría de la aerodinámica	Permitió comprender la naturaleza y el comportamiento de las fuerzas que actúan alrededor de las palas de las turbinas Y establecer los criterios básicos que debían cumplir las nuevas generaciones de turbinas eólicas
1927	El holandés A.J. Dekker construye el primer rotor provisto de palas con sección aerodinámica	Capaz de alcanzar velocidades en punta de pala, cuatro o cinco veces superiores la del viento incidente.
	Betz demostró que el rendimiento de las turbinas aumenta con la velocidad de rotación	En cualquier caso, ningún sistema eólico podía superar el 60% de la energía contenida en el viento.
1929	Proteccionismo de recurso energéticos autóctonos derivado de la crisis energética	Se inhibe el desarrollo de las turbinas, sin embargo se continúan realizando estudios eólicos
1945	Escases de recursos energéticos derivado a la 2da guerra mundial	Los países europeos elaboraron programas nacionales para elegir los emplazamientos más adecuados donde deberían instalarse las grandes plantas eólicas
1950	Comienza el segundo periodo de desarrollo de la energía eólica	Acaba perdiendo interés al no resultar sus precios competitivos con los de los combustibles fósiles, por lo que el bajo precio del

		petróleo, hasta 1973, cerró el camino al desarrollo de la tecnología eólica
1973	Inicia un periodo de precios altos de los hidrocarburos	Los precios altos del petróleo se prolongaron hasta 1986 y favoreció el desarrollo de los aerogeneradores eólicos capaces de producir electricidad a precios competitivos
1991	El número de aerogeneradores instalados a finales de 1991 era superior a los 21000	Con un total de potencia de 2.200 MW, equivalente a dos centrales nucleares de gran potencia
2000	Se consolidan las turbinas de eje horizontal de dos o tres palas como las mejores opciones	En base a las experiencias obtenidas hasta el momento
2010	Se alcanza un nivel de desarrollo y de madurez de la tecnología altamente competitivo	Con turbinas de más de 5 MW de capacidad

Fuente: Elaboración propia

## 2.2 Principios físicos de la energía eólica

### 2.2.1 El recurso eólico

La determinación precisa del recurso eólico es una tarea difícil e incierta, especialmente cuando se compara con la energía solar o la energía hidráulica. Las razones para esto son las siguientes <sup>(14)</sup>:

- Gran variabilidad de velocidades de viento en las diferentes regiones del mundo.
- Debido a la cambiante topografía del terreno y su rugosidad se observan en pequeñas distancias inmensas diferencias en velocidad de viento y por ende en potencia.
- Un error del 10% en la velocidad del viento implica un error del 33% en la potencia eólica calculada, lo anterior debido a que la potencia eólica es proporcional al cubo de la velocidad del viento.

### 2.2.2 Patrones globales de circulación del viento

El viento es aire en movimiento y es una forma indirecta de la energía solar. Este movimiento de las masas de aire se origina por diferencias de temperatura causada por la radiación solar sobre la superficie terrestre, que junto a la rotación de la tierra, crean entonces los llamados patrones globales de circulación. En un día la energía solar que recibe la tierra es aproximadamente 100 veces el consumo mundial energético de un año y solo el 1% aproximadamente se convierte en movimiento atmosférico o viento <sup>(14)</sup>.

La mayor cantidad de energía solar se concentra en las regiones ecuatoriales, mientras que en los polos se recibe una mínima parte. Esto implica un mecanismo por el cual la energía recibida en las regiones ecuatoriales sea transportada a los polos.

La tabla siguiente resume el mecanismo de circulación de los vientos:

Numero Evento	Comportamiento	Consecuencia
1	Las masas de aire caliente en la región ecuatorial ascienden en una banda delgada de alrededor 100 Km de ancho	<b>Causando la formación de nubes y de relámpagos</b> Esta zona se llama la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Esta zona se ubica más o menos paralela al ecuador alrededor de la tierra (Ver Figura 2.1).

2	En la parte superior de la atmósfera estas masas de aire se dividen en dos, una alejándose hacia el norte y otra hacia el sur.	Al alejarse del ecuador, el aire se enfría y se vuelve más pesado. A aproximadamente 30° de latitud Norte y Sur, este aire empieza a descender, causando un clima seco y sin nubes. En estas latitudes es donde se encuentran los grandes desiertos alrededor del mundo” <sup>(12)</sup> .
3	A nivel de superficie terrestre, los vientos se devuelven hacia el ecuador como vientos alisios.	Debido a la rotación de la tierra su dirección se desvía hacia el oeste en los dos hemisferios norte y sur. Por esto la dirección de los vientos alisios es NE y SE (la dirección se determina por la dirección de donde viene el viento y no hacia donde se dirige).
4	La ZCIT se desplaza hacia al norte del ecuador durante el verano del hemisferio norte y hacia el sur en el invierno.	Es muy estable y por esto los vientos alisios son permanentes Dentro de esta zona, se encuentran vientos de baja intensidad, interrumpidos por un alto nivel de tormentas eléctricas. Al tiempo, se pueden experimentar largos períodos de calma de viento..
5	En el exterior de la circulación entre los trópicos, vientos del oeste son predominantes.	Esta circulación es más bien inestable y se caracteriza por una estructura ondulada y formación de depresiones atmosféricas moviéndose del oeste hacia el este.

“Debido a la distribución no homogénea de masas de tierra sobre el globo, ocurren desviaciones del patrón general de circulación de aire en movimiento. En promedio, mayor concentración de masas de tierra se encuentra en el hemisferio norte que en el hemisferio sur. Dado que la masa de tierra se calienta más fácilmente por el sol, que los océanos, la posición promedio de la ZCIT es 5° Norte del ecuador”<sup>(14)</sup>.

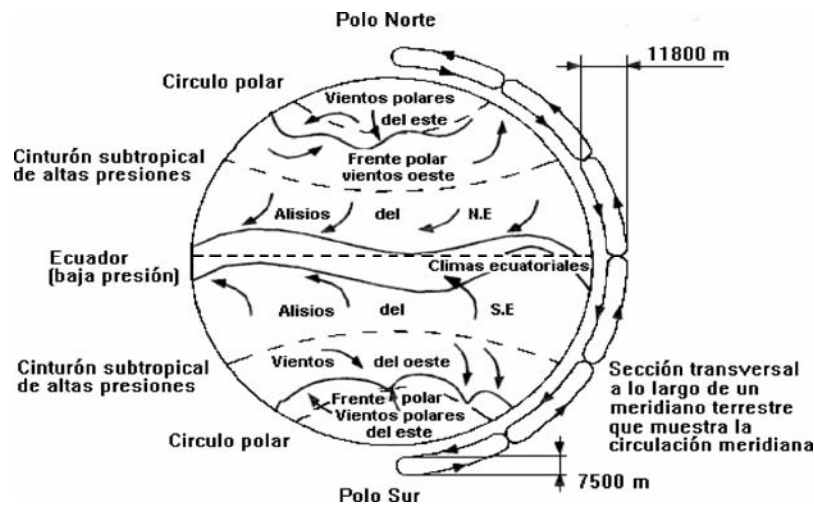


Figura 2.1. Representación del patrón global de circulación de vientos Fuente: Atlas eólico del país Vasco 1993

<sup>13</sup> Fernández Díez, Pedro. Energía eólica, España 2004.

<sup>14</sup> Pinilla S., Álvaro. Manual de Aplicación de la Energía Eólica. Julio 1997

### 2.2.3 Tipos de vientos

El conocimiento de los vientos generales no es suficiente para una correcta utilización y ubicación de máquinas eólicas, existen factores que modifican el régimen general y que deben ser conocidos y tomados en cuenta a la hora de planear un proyecto de este tipo.

Según el axioma de Bjerknes indica el movimiento o sentido de giro del viento: Cuando el gradiente de presión y el gradiente de temperatura tienen distinta dirección, se produce una circulación de aire de sentido el camino más corto desde el gradiente de presión al de temperatura <sup>(15)</sup>. En general, los desplazamientos verticales del aire son pequeños en relación a los desplazamientos horizontales, por lo que se puede considerar que la dirección del desplazamiento del viento es sensiblemente horizontal y se determina y refiere mediante el ángulo que conforma respecto a una dirección fija, que es la del Norte geográfico.

Tanto los vientos generales, como los sinópticos, están ligados a la circulación atmosférica y mantienen las mismas características sobre grandes extensiones de terreno. Según el autor Pedro Fernández Díez, define los tipos de viento que se enlistan en la siguiente tabla.

Tipo de viento	Características	Generalidades
<b>Sinóptico</b>	Viento de componente oeste, sopla prácticamente en la horizontal, lo que permite esquematizar su movimiento por un vector orientado en el sentido hacia el cual sopla y cuyo origen está situado en el lugar de observación	Los vientos regionales están regidos también por desplazamientos a la escala sinóptica de las masas de aire.
<b>Brisas</b>	Viento del componente norte, es el movimiento del aire tierra-mar en las costas, o tierra-agua en los lagos durante el día y la noche (figura 2.2)	En las faldas de las montañas el aire se calienta durante el día y se va hacia las alturas, mientras que en la noche el aire frío que es más pesado, baja hacia los valles (figura 2.3).
<b>Vientos catabaticos y anabaticos</b>	El viento <b>catabático</b> figura 2.4, es el producido por el descenso de aire fresco desde regiones elevadas o regiones más bajas, en forma de brisas, a través de laderas y valles.  El viento <b>anabático</b> es el que presenta una componente vertical ascendente, siendo el término opuesto a catabático.	Este tipo de viento presenta poca relación con las isobaras, puesto que viene regido principalmente por la dirección de los valles a través de los cuales desciende.
<b>Föhn</b>	Es un viento fuerte, seco y cálido, que se produce en ocasiones en la ladera de sotavento (contraria a la que sopla el viento) de los sistemas montañosos, figura 2.5.	También influye grandemente en la velocidad del viento la forma del relieve de la superficie de la tierra por donde discurre la corriente. Superficies de pendientes suaves y desnudas de obstáculos son los mejores lugares de potencial eólico, puesto que se van juntando las líneas de corriente del fluido y hacen que su velocidad aumente, figura 2.6 <sup>(15)</sup> .

<sup>15</sup> Fernández, Op. Cit., p. I-10.

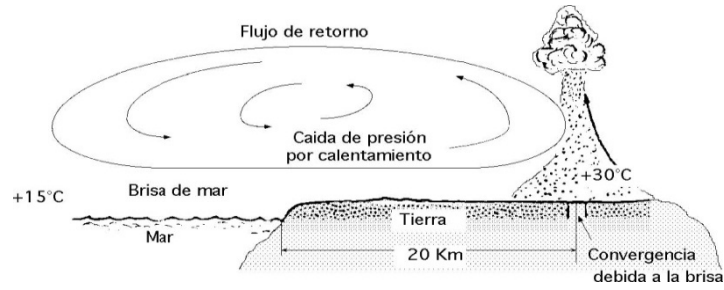
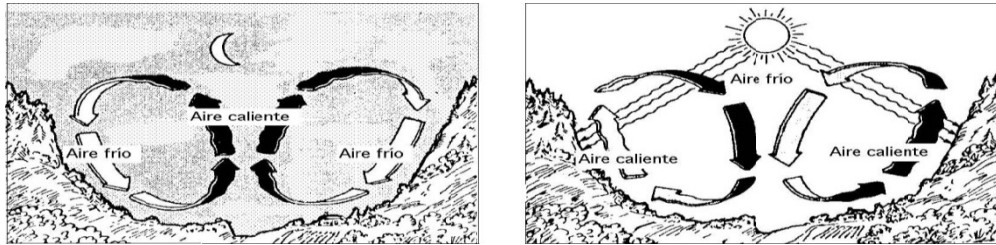


Fig 2.2 Esquema general de un viento particular tierra-mar y viceversa (brisas)



Vientos de valles y montañas



Brisas de mar

Fig 2.3 Vientos particulares y locales

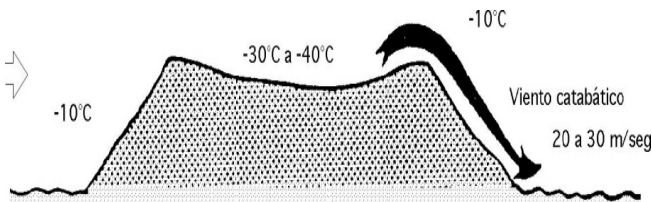


Fig.2.4. Viento catabático

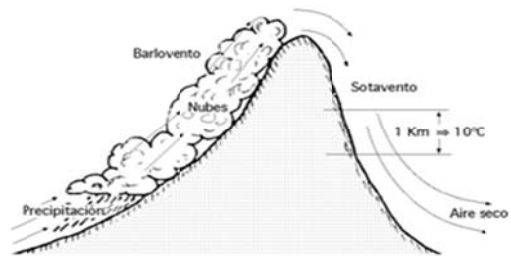


Figura 2.5 Efecto föhn

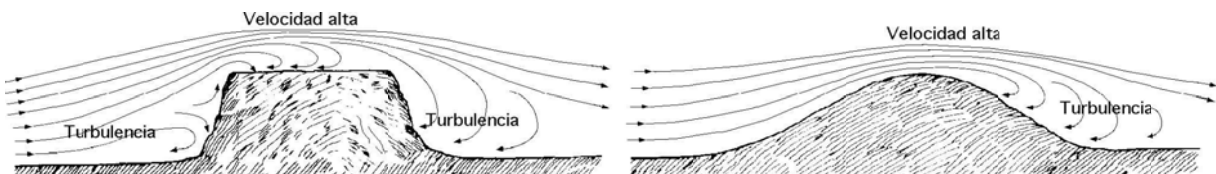


Figura 2.6 Influencia de obstáculos topográficos sobre la velocidad del viento

Fuente: Fernández Díez, Pedro. Energía eólica, España 2004

## 2.3 Aspectos técnicos de la energía eólica

### 2.3.1 Velocidad del viento

El viento viene definido por dos parámetros esenciales que son, su dirección y su velocidad. La dirección del viento y su valoración a lo largo del tiempo conducen a la ejecución de la llamada **rosa de los vientos**, figura 2.7.

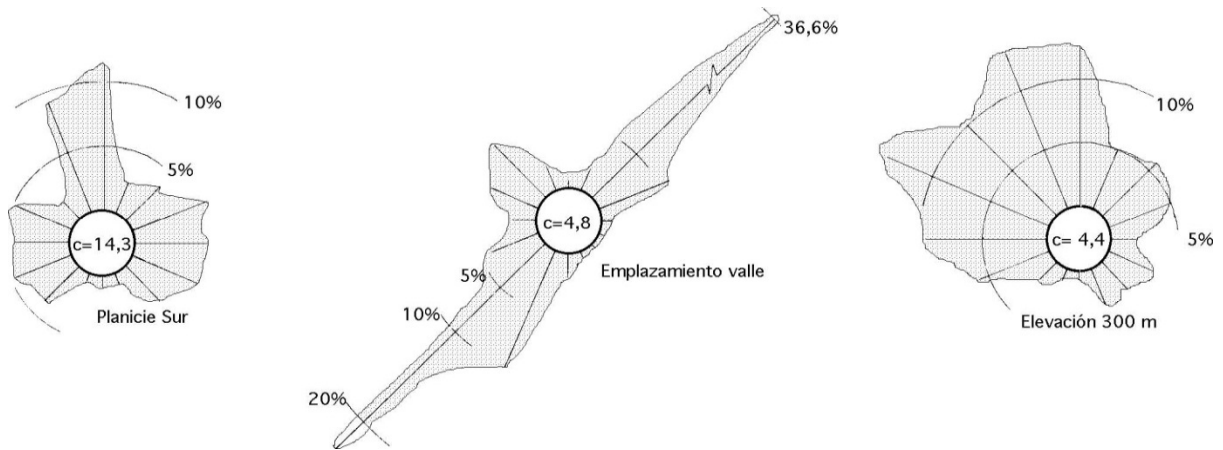


Figura 2.7 Rosas de viento características. Fuente: Fernández Díez, Pedro. Energía eólica, España 2004

La velocidad media del viento varía entre 3 y 7 m/seg, según diversas situaciones meteorológicas; es elevada en las costas, más de 6 m/seg, así como en algunos valles más o menos estrechos. En otras regiones es, en general, de 3 a 4 m/seg, siendo bastante más elevada en las montañas, dependiendo de la altitud y de la topografía.

La velocidad media del viento es más débil durante la noche, variando muy poco, aumenta a partir de la salida del Sol y alcanza un máximo entre las 12 y 16 horas solares.

Para realizar la medida de las velocidades del viento se utilizan los anemómetros, figura 2.8; existen muy diversos tipos de estos aparatos, que en un principio se pueden clasificar en anemómetros de rotación y anemómetros de presión.

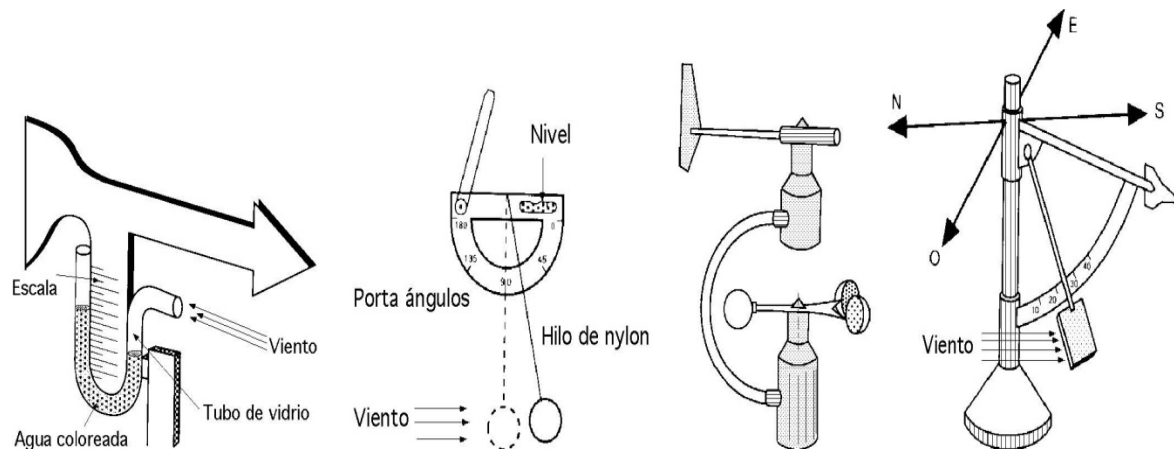


Figura 2.8 Diversos tipos de anemómetros

Fuente: Fernández Díez, Pedro. Energía eólica, España 2004

La dirección del viento se comprueba mediante una veleta, mientras que la velocidad se mide con un anemómetro. Según sea la velocidad se pueden considerar tres tipos de definiciones:

- Viento instantáneo; se mide la velocidad del viento en un instante determinado.
- Viento medio aeronáutico; se mide la velocidad media durante 2 minutos
- Viento medio meteorológico; se mide la velocidad media durante 10 minutos

Hay que distinguir también entre **golpe de viento** y **ráfagas**. Una **ráfaga** es un aumento brutal y de corta duración de la velocidad del viento, propio de tormentas y borrascas. El **golpe de viento** concierne a la velocidad media del viento, cuando sobrepasa los 34 nudos, 62 km/hora, y es una señal de advertencia, sobre todo para la navegación marítima. Un golpe de viento se corresponde con una velocidad media del viento comprendida entre 75 y 88 km/hora.

Las fuentes eólicas más interesantes se encuentran en las costas marinas y en determinados pasos entre montañas; existen zonas en las que se puede disponer de más de 3000 kWh/m<sup>2</sup> por año, y en otras puede que no se llegue a los 200 kWh/m<sup>2</sup> por año.

**Ley exponencial de Hellmann.** La velocidad del viento varía con la altura, siguiendo aproximadamente una ecuación de tipo estadístico, conocida como ley exponencial de Hellmann, que es de la siguiente forma:

$$V_h = V_0 \left( \frac{h}{h_0} \right)^\alpha$$

Dónde:

$V_h$  es la velocidad del viento a la altura "h"

$V_0$  es la velocidad medida del viento a la altura  $h_0$

$\alpha$  es el exponente de Hellmann que varía con la rugosidad del terreno y cuyos valores se muestran en la tabla 2.1

Fuente: Fernández Díez, Pedro. Energía eólica, España 2004

Tabla 2.1. Valores del exponente de Hellmann en función de la rugosidad del terreno

Lugares llanos con hielo o hierba	$\alpha = 0,08 + 0,12$
Lugares llanos (mar, costa)	$\alpha = 0,14$
Terrenos poco accidentados	$\alpha = 0,13 + 0,16$
Zonas rústicas	$\alpha = 0,2$
Terrenos accidentados o bosques	$\alpha = 0,2 + 0,26$
Terrenos muy accidentados y ciudades	$\alpha = 0,25 + 0,4$

En la figura 2.9, se indican las variaciones de la velocidad del viento con la altura según la ley exponencial de Hellmann.

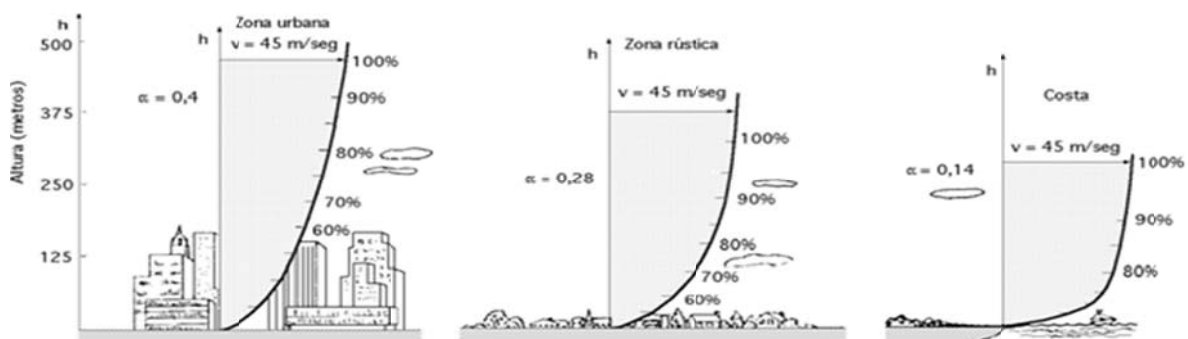


Fig 2.9 Variación de la velocidad del viento (capa límite) con la altura sobre el terreno, según la ley exponencial de Hellmann

Fuente: Fernández Díez, Pedro. Energía eólica, España 2004



Debido a que las máquinas eólicas arrancan para una determinada velocidad del viento, al tiempo que proporcionan la máxima potencia para unas velocidades iguales o superiores a una dada  $v_{nom}$ , es natural que los datos a utilizar sean las curvas de duración de velocidad que se pueden convertir en curvas energéticas utilizando en el eje de ordenadas cantidades ( $N = kv^3$ ) que proporcionan la potencia disponible en el viento para cada velocidad y de la que sólo es posible extraer una fracción. La curva de duración de la velocidad tiende a aplanarse cuando aumenta el tiempo durante el cual el viento persiste a una cierta velocidad.

En una máquina eólica se pueden considerar tres velocidades del viento características:

- La velocidad de conexión  $v_{conex}$ : Aquella por encima de la cual se genera energía, por debajo de esta velocidad no se genera energía.
- La velocidad nominal  $v_{nom}$ : La máquina eólica alcanza su potencia nominal. Por encima de esta velocidad la potencia extraída del viento se puede mantener constante.
- La velocidad de desconexión  $v_{emb}$ : Por encima de esta, la máquina eólica deja de generar ya que las partes internas se pueden dañar.

### Curvas de potencia

Mediante las curvas de potencia se pueden conocer cuando una aeroturbina suministra energía. Cuando el viento supera la velocidad mínima  $v_{conex}$  la máquina comienza a suministrar potencia aumentando ésta a medida que aumenta la velocidad del viento, hasta que éste alcanza una velocidad  $v_{nom}$  que se corresponde con la potencia nominal del generador; para velocidades superiores los sistemas de control mantienen constante la potencia, evitando una sobrecarga en la turbina y en el generador.

Las curvas que relacionan la velocidad del viento, con el número de horas de funcionamiento del aerogenerador,  $t = f(v)$ , indican el número de horas al año en que la velocidad del viento supera un cierto nivel. A partir de estas curvas se puede obtener la curva de potencia disponible del viento, y la curva de potencia eléctrica suministrada por el aerogenerador. El área encerrada por esta última, proporciona la energía eléctrica generada en un año, siendo frecuente expresar estas potencias y energías, por unidad de superficie barrida por el rotor.

### 2.3.2 Representación estadística del viento

Dadas las características tan dispersas y aleatorias de la energía eólica, es obvio que la única manera de estudiar si un emplazamiento es adecuado o no, es utilizando la estadística. Para ello se recurre a la representación de la velocidad del viento como una variable aleatoria con una cierta función de distribución.

Normalmente se suele utilizar la distribución de Weibull; se trata de una distribución de dos parámetros: un parámetro de escala  $c$  y un parámetro factor de distribución de forma  $k$ . La distribución estadística de las velocidades del viento varía de un lugar a otro del globo, dependiendo de las condiciones climáticas locales, del paisaje y de su superficie. La distribución de Weibull utilizada puede variar tanto en la forma como en el valor medio.

Factor de distribución de forma	
La energía $\hat{N}$ que portaría el viento si se desplazase con una velocidad igual a la media durante las 8760 horas del año, sería:	$\hat{N} = \int_0^{8760} k \cdot \hat{v}^3 dt = 8760 k \cdot \hat{v}^3 = 4380 \rho A \hat{v}^3$
Mientras que la energía realmente disponible en el año es:	$N_{anual} = \int_0^{8760} k \cdot v^3 dt$
El factor de distribución de forma de energía eólica $k$ , se define como la relación entre la energía obtenida en un año, $N_{anual}$ , y la energía $\hat{N}$ que se obtendría en ese año si la velocidad del viento se mantuviera constante e igual a la velocidad media $\hat{v}$ .	$k = \frac{N_{anual}}{\hat{N}} = \frac{v^3}{\hat{v}^3}$

El parámetro de forma  $k$  indica cuan puntiaguda es la distribución de velocidades del viento; si siempre tienden a estar próximas a un cierto valor, la distribución tendrá un alto valor de  $k$ , y será muy puntiaguda.

Si los factores de distribución son $k_1$ y $k_2$ y las energías disponibles $N_1$ y $N_2$ , se tiene que:	$\frac{N_1}{N_2} = \frac{k_1}{k_2} \left( \frac{\hat{v}_1}{\hat{v}_2} \right)^3$
Fuente: Fernández Díez, Pedro. Energía eólica, España 2004	

En la mayoría de los casos los valores de  $k$  están comprendidos entre 1,3 y 4,3; por ello, cuando no se dispone de muchos datos suele aceptarse la simplificación de hacer  $k=2$ , que se conoce como distribución de Rayleigh.

### Distribución de Rayleigh

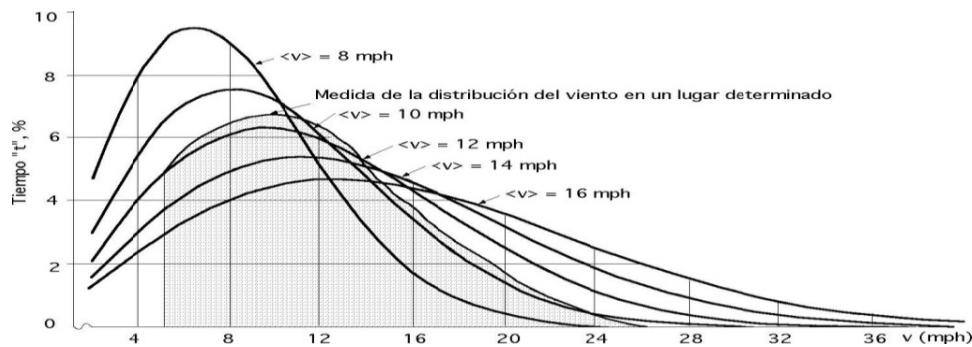
Con los datos disponibles de la velocidad del viento en un determinado lugar, se puede encontrar la ecuación de distribución de Rayleigh que describe la distribución de velocidades del viento con una aproximación razonable dentro de ciertos límites, siendo la velocidad media del mismo un parámetro a tener en cuenta, muy característico.

Para velocidades del viento por debajo de 15 km/hora, la distribución de Rayleigh tiene poca precisión, no siendo útil su aplicación en lugares con una velocidad media del viento inferior a 13 km/hora. El área bajo cualquier curva siempre vale la unidad, ya que la probabilidad de que el viento sopla a cualquiera de las velocidades, incluyendo el cero, debe ser del 100%. La mitad del área está a la izquierda de la vertical que pasa por el máximo, y el valor correspondiente es la mediana de la distribución, que significa que la mitad del tiempo el viento soplará a menos de ese valor y la otra mitad soplará a más de ese valor.

La curva de la distribución de Rayleigh es de la forma:

$t = 8,76 \frac{\pi}{2} \frac{v}{\hat{v}} e^{-\xi} ; \quad \xi = \frac{\pi}{4} \left( \frac{v}{\hat{v}} \right)^2$	Siendo, $t$ , Tiempo en horas $v$ la velocidad del viento en millas/seg $\hat{v}$ , la velocidad media del viento
Fuente: Fernández Díez, Pedro. Energía eólica, España 2004	

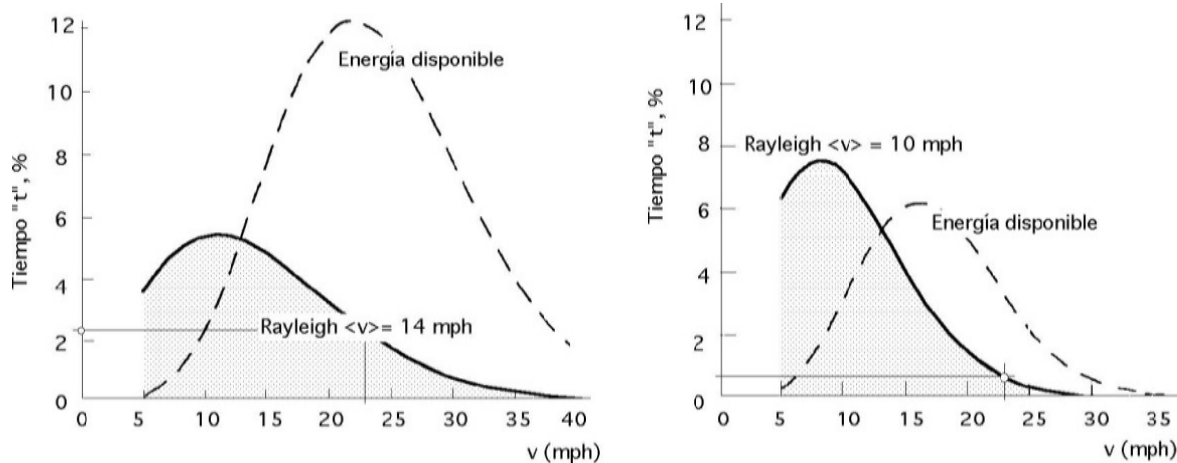
Esta ecuación proporciona el número total de horas al año que se prevé pueda soplar el viento a la velocidad media  $\hat{v}$  del lugar. Su representación gráfica se presenta en la gráfica 2.1, en la que se ha considerado el tiempo sobre el eje de ordenadas en %, y la velocidad del viento  $v$  en millas por hora sobre el eje de abscisas.



Gráfica. 2.1. Curva de la distribución de Rayleigh

Fuente: Fernández Díez, Pedro. Energía eólica, España 2004

Si a los resultados obtenidos en un lugar determinado, por ejemplo con una velocidad media de 26 km/h, (16,2 mph), grafica 2.2, se superpone una gráfica de Rayleigh, se observa que la distribución de Rayleigh no coincide con la curva de distribución del viento en el lugar indicado, lo que indica que no se pueden sustituir los datos obtenidos de la distribución de Rayleigh como medidas actualizadas y propias de la velocidad del viento del lugar, pero sí pueden servir como una aproximación bastante razonable cuando los únicos datos de que se dispone sean los promedios anuales de la velocidad del viento.



Gráfica 2.2.- Comparación de la energía disponible con la curva de Rayleigh correspondiente

Fuente: Fernández Díez, Pedro. Energía eólica, España 2004

La función de densidad de probabilidad de la distribución de Rayleigh es de la forma:	$f(v) = \frac{\pi}{2} \frac{v}{v} \frac{1}{v} e^{-\zeta}$
Siendo la función de distribución correspondiente:	$F(v) = 1 - e^{-\zeta}$
Fuente: Fernández Díez, Pedro. Energía eólica, España 2004	

Esta distribución se ajusta haciendo coincidir la velocidad media del viento en el lugar en estudio, con la velocidad  $v$ .

### Distribución de Weibull

Se emplea cuando se dispone de más datos, en este caso la distribución se ajusta más a la realidad.

La función de densidad de probabilidad de esta distribución es de la forma:	$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$
Se trata de una distribución de dos parámetros en la que $c$ y $k$ son los parámetros de escala y el factor de forma, respectivamente, que indican cómo de ventoso es, en promedio, el emplazamiento.	
La función de distribución es:	$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$
Fuente: Fernández Díez, Pedro. Energía eólica, España 2004	

## 2.4 Tecnología de la energía eólica

### 2.4.1 Clasificación de las máquinas eólicas

Las máquinas eólicas han sido estudiadas por el hombre en forma intensiva y dentro de ellas existen en la actualidad diferentes tipos que van desde pequeñas potencias, a las grandes máquinas americanas y alemanas de varios MW.

Son numerosos los dispositivos que permiten el aprovechamiento de la energía eólica, pudiéndose hacer una clasificación de los mismos según la posición de su eje de giro respecto a la dirección del viento.

Las máquinas eólicas se pueden clasificar en <sup>(16)</sup>:

- a) Aeroturbinas de eje vertical
- b) Aeroturbinas de eje horizontal

Dentro de ellas las aeroturbinas de eje horizontal se encuentran más desarrolladas, tanto desde el punto de vista técnico como comercial.

#### Maquinas eólicas de eje vertical

Entre las máquinas eólicas de eje vertical se pueden citar:

- a) **El aerogenerador Savonius** figura 2.10 que puede arrancar con poco viento, siendo muy sencilla su fabricación; tiene una velocidad de giro pequeña y su rendimiento es relativamente bajo.
- b) **El aerogenerador Darrieux** o de catenaria figura 2.11, requiere para un correcto funcionamiento, vientos de 4 a 5 metros por segundo como mínimo, manteniendo grandes velocidades de giro y un buen rendimiento; se construyen con 2 ó 3 hojas.
- c) **El molino vertical de palas tipo giromill o ciclogiro** que deriva del Darrieux; tiene entre 2 y 6 palas. El modelo Darrieux arranca mal, mientras que el Savonius se puede poner en funcionamiento con una pequeña brisa; debido a ello se puede hacer una combinación sobre un mismo eje de ambas máquinas de forma que un rotor Savonius actúe durante el arranque y un rotor Darrieux sea el que genere la energía para mayores velocidades del viento.

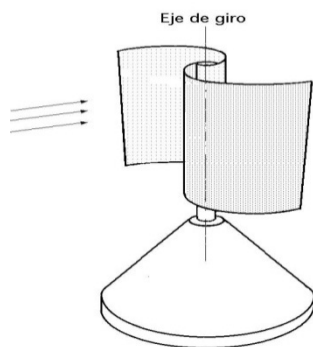


Figura 2.10 Rotor Savonius

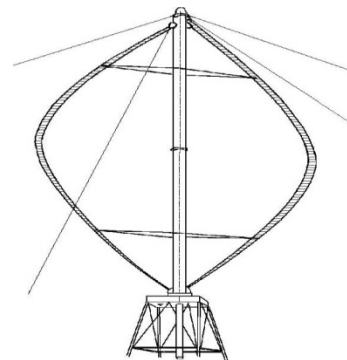


Figura 2.11 Aerogenerador Darrieux

Fuente: Fernández Díez, Pedro. Energía eólica, España 2004

Las ventajas de los aerogeneradores de eje vertical frente a los de eje horizontal, son:

- a) No necesitan sistemas de orientación
- b) Los elementos que requieren un cierto mantenimiento pueden ir situados a nivel del suelo
- c) No requieren mecanismos de cambio de revoluciones, por cuanto no suelen emplearse en aplicaciones que precisen una velocidad angular constante.

Las ventajas de los aerogeneradores de eje horizontal respecto de los de eje vertical son:

- a) Mayor rendimiento
- b) Mayor velocidad de giro (multiplicadores más sencillos)
- c) Menor superficie de pala  $S$  a igualdad de área barrida  $A$
- d) Se pueden instalar a mayor altura, donde la velocidad del viento es más intensa

### **Aerogeneradores de eje horizontal**

Desde los primeros diseños de aerogeneradores para la utilización comercial, hasta los actuales, ha habido un progresivo crecimiento en la potencia de las turbinas (mayores rotores y alturas de torre), con progresivos descensos en el coste de generación por kWh.

Los aerogeneradores de eje horizontal se clasifican según su velocidad de giro o según el número de palas que lleva el rotor, aspectos que están íntimamente relacionados, en rápidos y lentos.

En los aerogeneradores de eje horizontal rápidos, el rotor está constituido por una hélice de 2 o más palas; los perfiles utilizados normalmente en las mismas son muy parecidos al perfil de ala de avión, por cuanto éstos están muy estudiados y se conocen muy bien sus características; dichos perfiles se eligen teniendo en cuenta el número de revoluciones por minuto que se desea adquiera el aparato, definiéndose el perfil en función de:

- a) La forma de la estructura del mismo respecto a sus líneas medianas o cuerdas a distintas distancias del eje de giro.
- b) De su espesor con relación a la longitud característica de la cuerda
- c) De la simetría o no de las palas, etc.

La forma de la pala es función de la potencia deseada, al igual que su velocidad de rotación, eligiéndose perfiles que no creen grandes tensiones en los extremos de las palas por efecto de la fuerza centrífuga, de forma que el número de revoluciones por minuto máximo  $n_{m\acute{a}x}$  no supere la relación ( $n_{m\acute{a}x} \times D = 2000$ ), siendo  $D$  el diámetro de la hélice en metros<sup>(17)</sup>.

Para aerogeneradores destinados a la obtención de energía eléctrica, el número de palas puede ser de 2 ó 3, ya que la potencia generada no depende más que de la superficie "A" barrida por la hélice y no del número de palas. La aeroturbina puede accionar dos tipos distintos de generadores eléctricos, de corriente continua (dinamos), o de corriente alterna (síncronos, asíncronos, etc.), pueden estar conectados directamente o mediante un sistema de multiplicación de engranajes. La figura 2.12 muestra la configuración típica de una turbina eólica de eje horizontal.

<sup>16</sup> Pinilla, Op. Cit. p. 27.

<sup>17</sup> Fernández, Op. Cit. p. IV – 61.

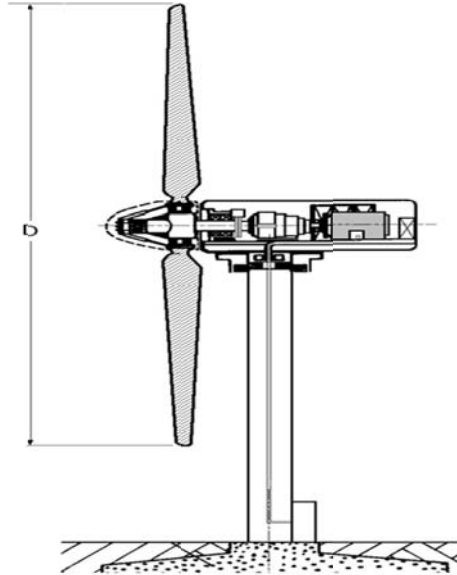


Figura 2.12 Aerogenerador de eje horizontal. Fuente: Fernández Díez, Pedro. Energía eólica. España 2004

La potencia nominal, en primera aproximación, viene dada por la expresión:  $N = 0.20D^2v^3$ , en la que N viene dada en vatios, D en metros y  $v$  en m/seg.

El autor Pedro Fernández Díez, define a la relación de velocidad específica o periférica TSR (Tip Speed Ratio), como un término que sustituye al número de revoluciones por minuto  $n$  del rotor y sirve para comparar el funcionamiento de máquinas eólicas diferentes, por lo que también se le suele denominar velocidad específica <sup>(18)</sup>.

El TSR indica que la periferia de la pala circula a una velocidad TSR veces mayor que la velocidad del viento  $v$  y es la relación entre la velocidad periférica  $u$  de la pala ( $Rw$ ) la del punto más exterior sobre la misma a partir del eje de rotación, y la velocidad  $v$  del viento, en la forma:

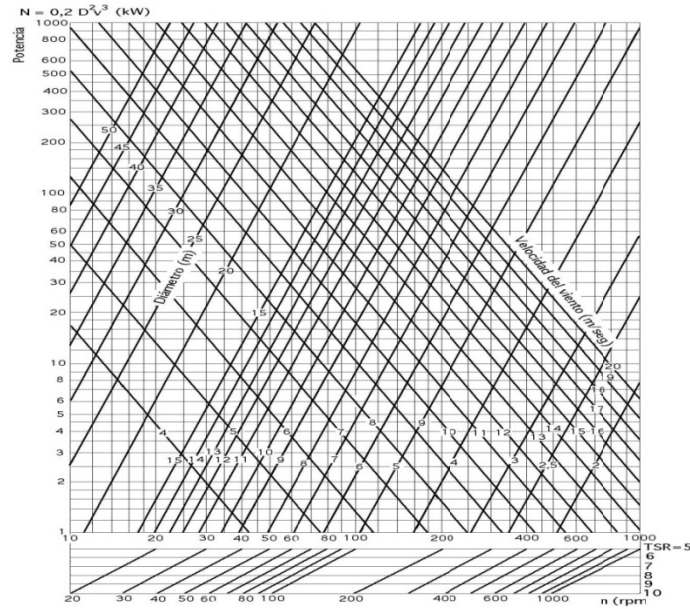
$$\text{TSR} = \frac{\text{Velocidad de la periferia de la pala}}{\text{Velocidad del viento}} = \frac{R w}{v} = \cotg \theta = \frac{\pi R n}{30 v}$$

Con la gráfica 2.3 se puede determinar la potencia de un aerogenerador rápido en función del nº de rpm, el TSR, la velocidad del viento y el diámetro de la superficie barrida por las palas.

La potencia máxima de un aerogenerador rápido se obtiene para valores del TSR altos, del orden de 7 a 10, requiriéndose velocidades del viento superiores a 6 m/seg. Su rendimiento es del orden del 35% al 40%, que es un valor más alto que el de los multipala.

Con 3 o 4 palas se consigue un par de arranque importante, por cuanto en la puesta en marcha la fuerza ejercida por el viento es proporcional al número de palas (de ahí el uso de rotores multipala, para el bombeo de agua, que requieren un buen par de arranque dadas las características del fluido a bombear), cosa que no se consigue con aparatos bipala que, en algunos casos, precisan de energía adicional para comenzar a funcionar.

<sup>18</sup> Fernández, Op. Cit. p. IV – 62.



Gráfica 2.3 Diagrama para la determinación de la potencia en aerogeneradores rápidos

Fuente: Fernández Díez, Pedro. Energía eólica. España 2004

### 2.4.2 Componentes de los equipos de conversión de energía eólica <sup>(19)</sup>

#### Rotor

El rotor de una turbina eólica, es la parte esencial para la conversión de energía, el rotor convierte la energía cinética del aire en energía mecánica rotacional útil en un eje. Este se compone de las aspas y el cubo (elemento de sujeción de las aspas y conexión del eje del equipo).

Los rotores de las turbinas de eje horizontal se disponen a barlovento o a sotavento. Turbinas a barlovento vienen provistas de una cola, la cual orienta el rotor para enfrenar el viento. Turbinas a sotavento utilizan el rotor mismo para orientarse, tienen la desventaja de que el viento debe pasar a través de la torre antes de incidir sobre el rotor. Este paso por la torre causa una disminución en la energía del viento.

La tabla 2.3 relaciona el tamaño, la potencia nominal del equipo y la velocidad típica de rotación del rotor para una velocidad de viento nominal de 12 m/s.

<i>Díámetro del rotor en metros</i>	<i>Potencia Nominal a 12 m/s de viento</i>	<i>Velocidad de Rotación Típica en r.p.m.</i>
1	100 w	1000
2.5	1 Kw	500
7.0	8 Kw	200
17.5	50 Kw	80
25.0	100 Kw	50
40.0	260 Kw	35

Tabla 2.3 Tamaño típico de aerogeneradores eléctricos y su velocidad de rotación

Fuente: Pinilla S., Álvaro. Manual de Aplicación de la Energía Eólica, Julio 1997

<sup>19</sup> Manu Pinilla, Op. Cit. p. 29



## Sistema de transmisión

El sistema de transmisión es aquel sistema que convierte la energía rotacional suministrada por la turbina a través de su eje, en movimiento oscilante del vástago de la bomba para aerobombeo o alimentación del generador eléctrico en aerogeneración.

En aerogeneración con sistemas pequeños (menos de 10 Kw de potencia eléctrica nominal) se utiliza comúnmente generadores de imanes permanentes especialmente diseñados para ser acoplados a turbinas eólicas, y por tanto no se utiliza una caja de aumento de velocidad de rotación, realizándose una conexión directa entre el rotor y el generador. Estos equipos eólicos generalmente giran a velocidades hasta de 500 rpm.

Para equipos eólicos de mayor capacidad, se requiere una caja de aumento de velocidades para excitar el generador eléctrico a velocidades de giro hasta 1800 rpm, teniendo en cuenta que la turbina eólica gira entre 30 y 100 rpm, dependiendo de su diámetro.

## Torre

Para maximizar la eficiencia de extracción de energía del viento, las turbinas eólicas deben estar localizadas por encima de obstrucciones que perturban el flujo del aire. Aire perturbado por influencia de obstrucciones como vegetación, árboles, edificios, etc. no fluye suave sobre la turbina reduciendo la eficiencia de conversión. Como regla general, para pequeñas turbinas eólicas, el rotor se debe colocar por lo menos 10 metros encima del obstáculo y una localización horizontal no menor a 100 metros de distancia del mismo.

Existen tres tipos básicos de torres: pivotante, autoportante y atirantada.

La torre pivotante esta abisagrada en la base y permite ser levantada desde el piso con la turbina ensamblada. Las torres pivotantes son desarrollos recientes en la industria eólica y han simplificado las tareas de mantenimiento y reparación de los sistemas.

Torres autoportantes son aquellas que no requieren de soporte externos. Estas torres son ancladas en bases de concreto. Existen torres autoportantes de dos tipos: de celosía o tubulares. La torre de celosía es la forma más común de torre y han sido utilizadas para soportar aerobombas y antenas de radio. Estas tienen tres o cuatro patas conectadas por soportes estructurales triangulares. La torre atirantada se soporta lateralmente por cables y anclajes.

## Sistema de seguridad

Todos los equipos eólicos poseen algún tipo de sistema de seguridad para protegerlo de borrascas o incrementos inadecuados en la velocidad. Generalmente en equipos pequeños (esto es hasta 10 Kw de Potencia Nominal) el sistema de seguridad está asociado con el sistema de orientación; y este consiste de una cola o veleta detrás del rotor y el eje vertical del rotor esta descentrado con respecto al eje central de la torre.

Con esta combinación, a bajas velocidades de viento el rotor es adecuadamente orientado y con incremento en la intensidad del viento el rotor es gradualmente "sacado" del viento, disminuyendo su velocidad de rotación. A mayores incrementos de viento se logrará que el rotor pare lográndose total desconexión y protección total del equipo.

En equipos de mayores potencias (mayores a 10 Kw), el sistema de seguridad está asociado con controles electrónicos para protección directa de los elementos que integran el equipo.

## Generador

El generador es el elemento que convierte la energía rotacional del eje de la turbina en electricidad, la figura 2.13 ilustra la disposición de los elementos en un aerogenerador de tamaño mediano.

Como se mencionó anteriormente, en algunos casos se conecta a través de una caja de aumento de velocidad.

El generador produce corriente alterna o corriente directa. Los equipos eólicos de generación generan electricidad a una variedad de voltajes, desde 12 a 24 voltios D.C. para carga de baterías o 120 o 240 voltios A.C. para interconexión con la red eléctrica, aunque se pueden conseguir otros voltajes, según necesidad.

## Conexiones eléctricas y controladores

Las conexiones eléctricas y los controladores son todos los elementos necesarios para acondicionar y controlar la energía eléctrica producida por el aerogenerador. Esto incluye el barraje, contadores, switches de carga, inversores y baterías. Estos equipos son los que permiten controlar la calidad de suministro de energía eléctrica.

Para el sistema de carga de baterías, un controlador de carga es utilizado para proteger las baterías de descarga o sobrecarga. Generalmente se utiliza un inversor de corriente para convertir la corriente directa de las baterías en corriente alterna requerida para operar equipos eléctricos convencionales.

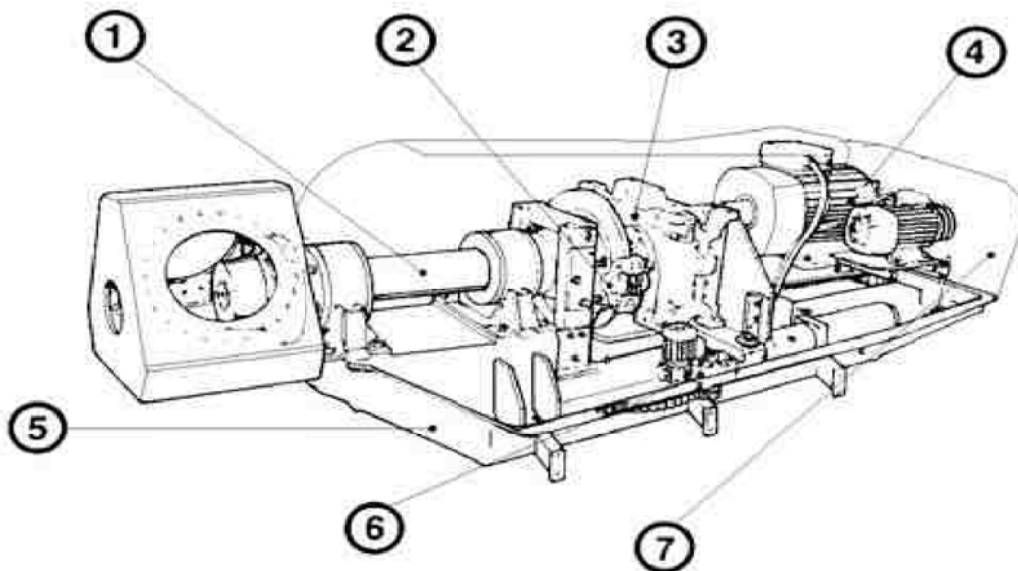


Figura 2.13 Disposición típica de elementos en un aerogenerador.

Fuente: Wind power for home & business 1993

1. Eje principal
2. Freno de disco
3. Caja de cambios (aumento de velocidad)
4. Generador eléctrico
5. Carcasa de soporte estructural
6. Mecanismo de giro vertical 7- Carcasa para cubrir elementos

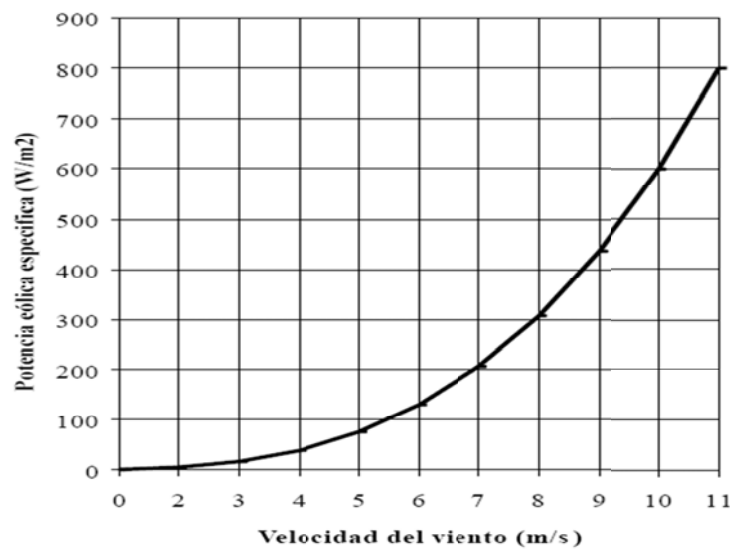
## 2.5 Cálculos de potencia y energía

### 2.5.1 Cálculo de la potencia del viento <sup>(20)</sup>

La potencia en el viento soplando con una velocidad  $V$  a través de un área  $A$  perpendicular a  $V$ , es:

$P_{\text{viento}} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (\text{w: vatios})$	<p>Dónde:</p> <p><math>P_{\text{viento}}</math>: es la potencia en el viento en vatios</p> <p><math>\rho</math>: es la densidad del aire (aprox. 1.2 Kg/m<sup>3</sup>)</p> <p><math>V</math>: es la velocidad del viento en m/s</p> <p><math>A</math>: es el área perpendicular al viento en m<sup>2</sup></p>
---	--

Si la velocidad del viento se duplica, la potencia es ocho veces más grande, ver grafica 2.4



Grafica 2.4 Potencia eólica específica en función de la velocidad para condiciones normales de presión y temperatura.

Fuente: Fuente: Pinilla S., Álvaro. Manual de Aplicación de la Energía Eólica, Julio 1997

Además de la velocidad del viento, la potencia eólica se ve además afectada por variaciones en la densidad del aire. Normalmente, la potencia eólica teórica se da como potencia eólica específica, esto es por unidad de área:

$P_{\text{viento}} = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (\text{w/m}^2)$	<p>Dónde:</p> <p><math>\rho</math> es la densidad del aire en kg/m<sup>3</sup></p> <p><math>P_{\text{viento}}</math> está expresada en vatios por metro cuadrado.</p>
<p>Fuente: Fuente: Pinilla S., Álvaro. Manual de Aplicación de la Energía Eólica, Julio 1997</p>	

<sup>20</sup> Manu Pinilla, Op. Cit. p. 11

La tabla 2.4 muestra la variación de la densidad del aire para diferentes alturas sobre el nivel del mar y temperatura.

Altura sobre el nivel del mar (m)	Densidad de Aire Seco en Kg/m <sup>3</sup> a:	
	20 °C	0 °C
0	1.204	1.292
500	1.134	1.217
1,000	1.068	1.146
1,500	1.005	1.078
2,000	0.945	1.014
2,500	0.887	0.952
3,000	0.833	0.894
3,500	0.781	0.839
4,000	0.732	0.786

Tabla 2.4 Densidad del aire a diferentes alturas sobre el nivel del mar

### 2.5.2 Metodología de evaluación de entrega de energía

Con el propósito de mostrar un método sencillo de evaluación del potencial eólico, se presenta el análisis de información tomada en una Isla durante un período continuo de 181 días (4340 horas)<sup>(21)</sup>.

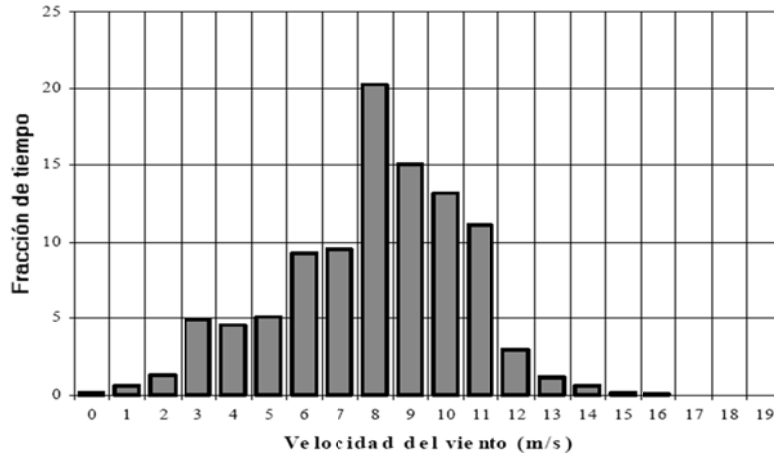
Como un primer paso, se debe clasificar los datos de velocidad promedio horaria por secciones. Esto es, dividir todo el rango de variación de la velocidad de viento en secciones de 1 m/s. Esta clasificación se conoce como la distribución de frecuencias de viento, que para el caso de la Isla se ilustra en la tabla 2.5 y gráfica 2.5.

Intervalo	Horas 181 días	Porcentaje (%)	Intervalo	Horas 181 días	Porcentaje (%)
0 - 1	8	0.18	10 - 11	570	13.13
1 - 2	26	0.60	11 - 12	482	11.10
2 - 3	56	1.29	12 - 13	127	2.92
3 - 4	212	4.88	13 - 14	51	1.17
4 - 5	195	4.50	14 - 15	27	0.63
5 - 6	221	5.10	15 - 16	7	0.16
6 - 7	402	9.26	16 - 17	5	0.11
7 - 8	414	9.54	17 - 18	1	0.03
8 - 9	880	20.27	18 - 19	1	0.03
9 - 10	654	15.06	19 - 20	1	0.03

Tabla 2.5 Distribución de frecuencias para 181 días de información

Fuente: Pinilla S., Álvaro. Manual de Aplicación de la Energía Eólica, Julio 1997

<sup>21</sup> Pinilla, Op. Cit. p. 20.

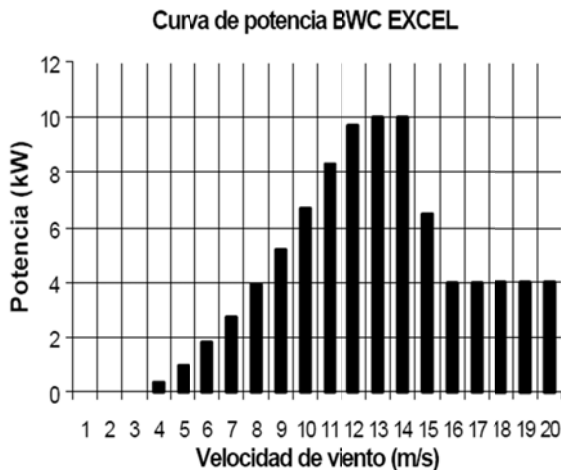


Gráfica 2.5 Distribución de velocidad de viento en un período continuo de 181 días.

Fuente: Fuente: Pinilla S., Álvaro. Manual de Aplicación de la Energía Eólica, Julio 1997

Para el período de medida (4340 horas) la velocidad promedio de viento es de 8.5 m/s a 10 metros de altura.

El siguiente paso consiste en elegir un equipo eólico comercial para su evaluación, que para este caso se escoge el equipo BERGEY Windpower Co BWC Excel, cuyas características se ilustran la gráfica 2.6 y tabla 2.6.



Gráfica 2.6. Curva característica de potencia de un Aerogenerador Bergey BWC – 10Kw

Potencia Nominal:	10 Kw
Velocidad Viento Nominal:	12.1 m/s
Velocidad de Arranque:	3.0 m/s
Velocidad de abatimiento:	16.0 m/s
Numero de Aspas:	3
Diámetro del Rotor:	7 metros
Altura de la torre:	10 metros

Tabla 2.6 - Características técnicas de aerogenerador Bergey BWC Excel

Fuente: Pinilla S., Álvaro. Manual de Aplicación de la Energía Eólica, Julio 1997

Con la información de distribución de viento y de curva de potencia del aerogenerador se puede entonces estimar la producción de energía en el período de análisis, tal y como se ilustra en la tabla 2.7.

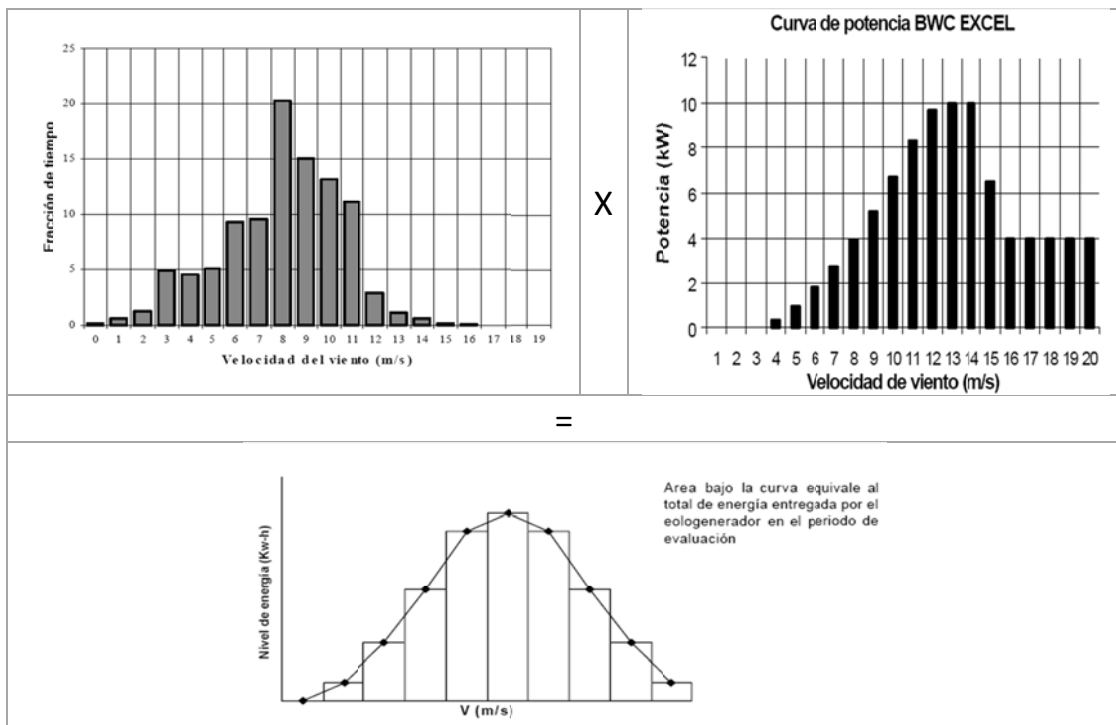
El estimativo de energía producida por el equipo BWC EXCEL para el período de análisis de 4340 horas, se realiza multiplicando el nivel de potencia del generador y el número de horas de viento en cada intervalo, la energía total producida es entonces la suma de la distribución de energía.

Intervalo (m/s)	Horas 181 días (4340 hrs) X	Potencia Instantánea en Kw =	Energía Producida en Kwhr
0 – 1	8	0	0.0
1 – 2	26	0	0.0
2 – 3	56	0	0.0
3 – 4	212	0.3	63.6
4 – 5	195	0.7	136.5
5 – 6	221	1.4	309.4
6 – 7	402	2.4	964.8
7 – 8	414	3.5	1449.0
8 – 9	880	4.5	3960.0
9 – 10	654	6.0	3924.0
10 – 11	570	7.5	4275.0
11 – 12	482	9.3	4482.6
12 – 13	127	10.0	1270.0
13 – 14	51	10.0	510.0
14 – 15	27	10.0	270.0
15 – 16	7	8.0	56.0
16 – 17	5	0.0	0.0
17 – 18	1	0.0	0.0
18 – 19	1	0.0	0.0
19 – 20	1	0.0	0.0

Tabla 2.7 Estimación de suministro de energía con equipo Bergey a 10 metros de altura de torre.

Energía total Producida en 4340 hrs: 21670.3 Kwhr

La tabla siguiente resume el procedimiento mostrado. La distribución de frecuencias de viento puede ser ajustada estadísticamente por la función de densidad de probabilidad de Weibull la cual se combina con la curva de potencia del generador eólico y se obtiene la curva de energía generada.



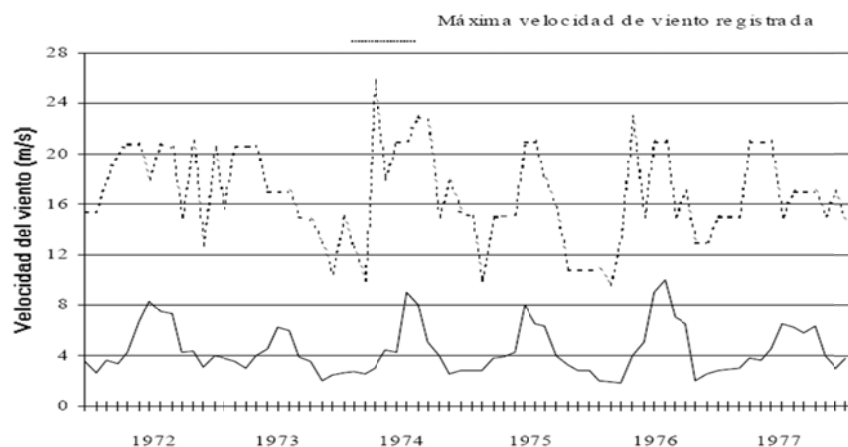
## 2.6 Información necesaria para evaluar el uso de la energía eólica

Esta sección revisa los requerimientos de datos meteorológicos para una adecuada evaluación del recurso eólico; y por ende dimensionamiento y evaluación de sistemas de conversión de energía eólica para generación eléctrica, bombeo de agua y otros usos potenciales. Adicionalmente, se mencionan los diversos métodos de adquirir y coleccionar datos meteorológicos de manera generalizada a escala regional o nacional.

### 2.6.1 Datos meteorológicos requeridos

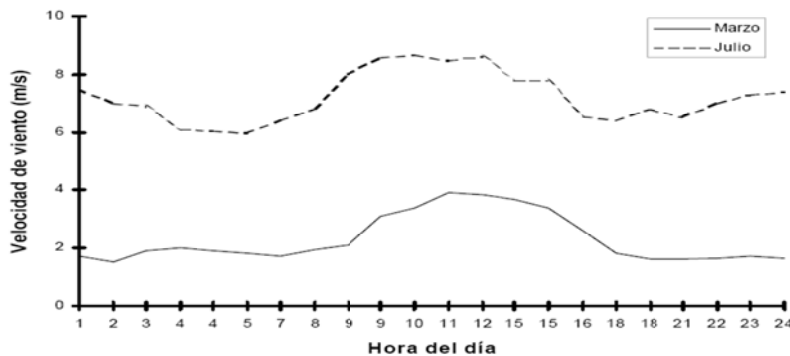
La información necesaria para evaluar la aplicación de sistemas de conversión de la energía eólica, es:

- **Velocidad de Viento Promedio Anual:** La velocidad de viento promedio por un período largo puede ser utilizada como una primera indicación de la viabilidad de uso de la energía eólica.
- **Variaciones Estacionales:** Datos sobre variaciones estacionales de la velocidad de viento son de importancia para estimar la variación estacional de entrega de energía, y así determinar el mes de diseño crítico (v.g.: mes de menor energía eólica disponible) para la instalación que se desea. La grafica 2.8 ilustra las variaciones estacionales que se presentan en un aeropuerto en el período de 1972 a 1977.
- **Variaciones Diurnas:** Variaciones a lo largo del día pueden tener influencia en la viabilidad de uso de la energía eólica (Grafica 2.9 ilustra las variaciones diarias en un Aeropuerto en los meses de Julio y Marzo).
- **Borrascas, vientos extremos:** Datos sobre borrascas y vientos de muy alta intensidad son necesarios para determinar las máximas velocidades de viento en las cuales cualquier equipo de conversión de energía eólica puede ser capaz de aguantar sin presentar daño.
- **Períodos de Calma:** Se requiere información sobre períodos largos de baja intensidad del viento para determinar las dimensiones de elementos como baterías o tanques de almacenamiento de agua para suplir suministro de energía cuando el equipo eólico no se encuentre en operación.
- **Distribución de Frecuencia de Velocidades de Viento:** Para realizar un estimativo adecuado de la probable producción de energía de cualquier equipo eólico, la distribución de frecuencia de la velocidad de viento (porcentaje del tiempo en que una velocidad de viento dada ocurre en el año).



Grafica 2.8 Variaciones estacionales en un aeropuerto entre 1972 y 1977

Fuente: Pinilla S., Álvaro. Manual de Aplicación de la Energía Eólica, Julio 1997



Gráfica 2.9 Variaciones diarias en un aeropuerto en los meses de Julio Marzo.

Fuente: Pinilla S., Álvaro. Manual de Aplicación de la Energía Eólica, Julio 1997

Una fuente natural de información son los registros de viento realizados por el servicio meteorológico nacional pero esta información debe ser estudiada con extremo cuidado. Muchas veces, el servicio meteorológico recauda información eólica en aeropuertos y los datos son colectados a 10 metros de altura sobre la superficie; o en otros casos, la medición de viento es realizada con fines agrometeorológicos y no energéticos, en medio de poblaciones con sistemas anticuados (descalibrados) y mal localizados con respecto al viento.

La evaluación del potencial energético eólico de una zona, es una labor que requiere tiempo además de recursos económicos para realizarse adecuadamente. Es necesario coleccionar datos meteorológicos por lo menos durante un año, si se desea realizar una prospección con cierto grado de certidumbre. A diferencia de la evaluación del recurso solar, donde se pueden cubrir mayores áreas con la evaluación de los parámetros meteorológicos; el recurso eólico, por su propia naturaleza, tiene un comportamiento específico en el lugar y presenta variaciones espaciales substanciales

Si se está planeando instalar una granja eólica para conexión a la red eléctrica, la inversión en el equipo de medición y los costos asociados son fuertemente justificados. La experiencia en esta última circunstancia, en los Estados Unidos, es que la evaluación sistemática para instalación de granjas eólicas (suministro mayor del megavatio) cuesta alrededor del cinco por ciento (5%) del costo total del sistema eólico.

### 2.6.2 Métodos utilizados para medir la velocidad del viento

Estimaciones del recurso eólico se basan en algunas estrategias útiles como son: Colección de información de manera empírica, anemómetros totalizadores, por factores de correlación, instalación de pequeños equipos eólicos o por adquisición de datos meteorológicos en tiempo real.

#### Información Empírica

Esta información se recoge con base a visitas realizadas al lugar, donde las condiciones de topografía, de vegetación y la información de los habitantes de la región aportan valiosa información en la identificación de lugares con altos niveles de velocidad de viento. Por ejemplo, la constante incidencia del viento en los árboles a lo largo del tiempo, o sobre la vegetación, hacen que estos crezcan inclinados en la dirección predominante del viento (Figura 2.14 ilustra la deformación causada en árboles de pino por la incidencia permanente del viento y su relación con la velocidad promedio anual esperada).



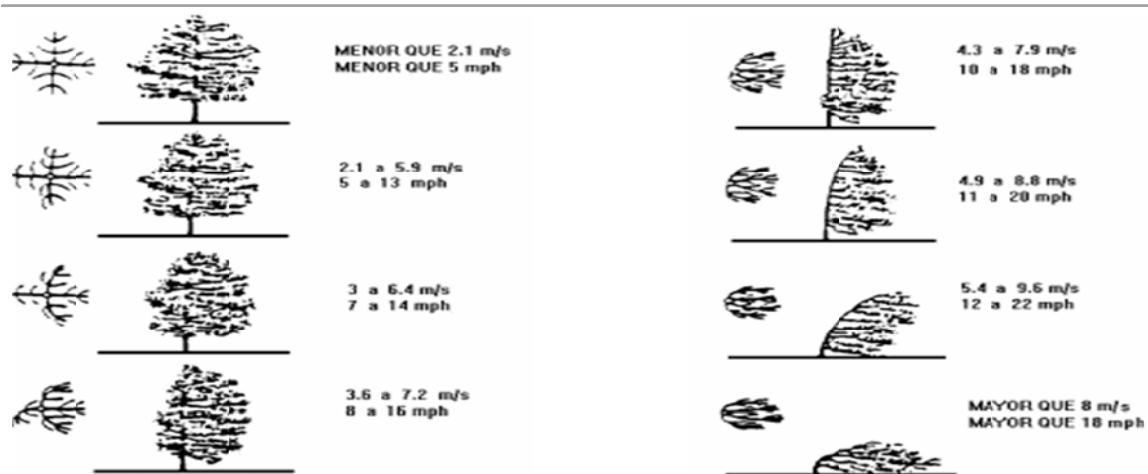


Figura 2.14 Deformación causada en los árboles por el viento y su relación con la velocidad promedio anual esperada  
 Fuente: Pinilla S., Álvaro. Manual de Aplicación de la Energía Eólica, Julio 1997

Información empírica puntual puede ser deducida, además, a partir de tablas como la escala de Beaufort que se presenta en la tabla 2.8, en esta tabla solo se indica las características de incidencia del viento en tierra, sin embargo existe una correspondencia con fenómenos sobre el mar, la cual no se incluye.

Análogamente, la presencia de algunos molinos de viento instalados años atrás, dan un verdadero indicio de que el lugar presenta un régimen adecuado de viento, para profundizar en su evaluación. Es claro que la información empírica, así recogida, no permite conocer un valor aproximado de velocidad promedio anual del viento, pero si permite identificar sitios para futura evaluación del recurso.

Numero Beaufort	Velocidad de Viento (m/s)	Efectos observados en tierra
0	0 - 0.2	Calma, humo asciende verticalmente
1	0.3 - 1.5	El humo indica la dirección del viento, aspas de molinos no se mueven
2	1.6 - 3.3	Se siente el viento en la cara; se mueven las hojas de los arboles; aspas de molinos se empiezan a mover
3	3.4 - 5.4	Hojas y ramas pequeñas se mueven constantemente; banderas livianas se extienden
4	5.5 - 7.9	Polvo, hojas y papel en el piso se levanta; ramas se mueven
5	8.0 - 10.7	Pequeños árboles comienzan a bambolear
6	10.8 - 13.8	Ramas grandes de los árboles en movimiento, silbido emana de cuerdas
7	13.9 - 17.1	Todo el árbol se mueve; resistencia fuerte al caminar contra el viento
8	17.2 - 20.7	Ramitas y ramas de los árboles se rompen; caminar es difícil

La escala de Beaufort va hasta el número 17 donde se indican velocidades de viento hasta de 60 m/s.

Tabla 2.8 Escala de Beaufort para la intensidad de viento

Fuente: Pinilla S., Álvaro. Manual de Aplicación de la Energía Eólica, Julio 1997

### Anemómetros Totalizadores

Una manera efectiva de determinar los valores promedios globales del comportamiento del viento es por medio de la instalación de anemómetros totalizadores. Estos elementos son anemómetros de cazoletas con medidor de revoluciones que al ser accionados por el viento miden el recorrido equivalente que ha pasado a través del instrumento. Al estar conectado al odómetro se podrá entonces establecer para un período dado de tiempo, el número de metros o kilómetros de recorrido. Esta relación entre el recorrido y el tiempo de medida, permite entonces conocer la velocidad promedio del viento. Así por ejemplo, si el período de medida del recorrido del viento es de una hora y se registran que han pasado 16.2 Km. de viento; la velocidad horaria será de 16.2 Km. por hora (4.5 m/s promedio horario).

Con la recopilación de esta información totalizada y con promedios de velocidad de viento, se caracteriza formalmente el régimen de vientos presente en un lugar, identificándose con gran certeza las variaciones tanto diurnas como mensuales o estacionales.

### **Método de Correlación**

Este método de estimación, permite combinar mediciones realizadas en un lugar específico, con registradores de velocidad de viento de cualquier tipo; con los datos publicados y suministrados por el servicio de meteorología en estaciones aledañas al lugar.

Se puede realizar mediciones de viento por un período corto de tiempo en un lugar (por ejemplo: algunos cuantos meses) y al comparar con datos obtenidos, simultáneamente, en una estación meteorológica cercana al lugar se pueden producir coeficientes numéricos de proporcionalidad a través de comparar los valores promedios medidos (diurnos y/o mensuales) con los datos publicados por el servicio de meteorología.

### **Instalación de Pequeños Equipos Eólicos**

Otra manera utilizada para evaluar el recurso eólico en un lugar, se realiza mediante la instalación de un pequeño equipo eólico y la medición de su funcionamiento sobre una base regular de tiempo. Este método, permite relacionar la característica del equipo con el régimen de vientos. En cierta medida, este método permite adquirir confianza sobre la generación eléctrica, ya que se obtiene un resultado dual (medición de vientos y generación de energía) para la evaluación del recurso en un lugar seleccionado. Claro está, que la selección del lugar donde debe estar instalado el equipo eólico se basa en el conocimiento empírico del régimen de vientos de los habitantes del lugar, o de la característica de la vegetación alrededor del lugar.

### **Adquisición de Datos en Tiempo Real**

Este método de evaluación es el más confiable y al mismo tiempo costoso para análisis del recurso. La oferta de equipos de adquisición de datos es cada vez mayor, y fundamentalmente consiste de un pequeño computador que almacena la información permanentemente, dependiendo de la necesidad del usuario, de manera que se pueden registrar promedios meteorológicos desde el rango de segundos hasta horas en las variables correspondientes. Como tal, los resultados de una evaluación con esta metodología garantizan un preciso y adecuado dimensionamiento de equipos eólicos para suministro de energía.

En una primera instancia y al recurrir a cualquier método de medición del recurso eólico, se recomienda utilizar registradores que permitan conocer la velocidad promedio del viento en períodos de una hora, a lo largo de por lo menos un año de medición. Esta información permitirá conocer variaciones diurnas, velocidades máximas, variaciones estacionales y la velocidad promedio anual del viento, sobre la base de datos horarios.

Hasta aquí se han presentado los principales conceptos y principios físicos que rigen el funcionamiento de las máquinas eólicas y los métodos para el cálculo de la energía potencialmente a generar. Estos métodos se utilizarán en el siguiente capítulo para determinar si los proyectos eólicos en la localización seleccionada son rentables o no.

## Capítulo III. Localización del proyecto y el potencial eólico de la zona

### 3.1 Antecedentes de la localización propuesta

En los capítulos anteriores analizamos la situación energética mundial y el porqué de la necesidad de contar con fuentes alternas de energías que sean sustentables ambiental y económicamente. Se analizó que la energía eólica es una de las más desarrolladas actualmente y promete ser una de las energías renovables más importantes en las próximas décadas. Se observó también que en México, esta energía no ha tenido el impulso necesario y al momento somos unos de los países con menor porcentaje de participación en este rubro.

Se estudió el mecanismo que mueve a la energía eólica y se analizaron los aspectos técnicos más importantes en materia de generación de electricidad a partir de esta energía. Ahora estamos en condiciones de proponer un proyecto y analizar su factibilidad técnico – económica a fin de determinar si este tipo de energía es aplicable en el área seleccionada.

En este capítulo se propone la localización del proyecto en un área marina comprendida en la Sonda de Campeche y el de Litoral de Tabasco, se estudia la zona y se determina el potencial eólico a partir de datos históricos. También se analiza el modo de generación de electricidad actual y se propone una nueva filosofía de generación.

#### 3.1.1 Localización del proyecto

La Sonda de Campeche y El Litoral de Tabasco es la zona marítima correspondiente a la prolongación submarina de la península de Yucatán enfrente de Campeche y Tabasco en aguas del golfo de México.

Esta prolongación ocurre hacia el poniente y hacia el norte de la citada península. En ocasiones se confunde a la denominada Sonda de Campeche con el golfo de Campeche y aun con la bahía del mismo nombre. Se trata de términos definiendo accidentes geográficos diferentes.



Figura 3.1 Localización respecto de la Península de Yucatán de la Sonda de Campeche

Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Sonda\\_de\\_Campeche](http://es.wikipedia.org/wiki/Sonda_de_Campeche), 2011



Fig. 3.2 Esquema ilustrativo del área en estudio

### Configuración de la Sonda de Campeche

La extensión submarina de la península que da marco a la Sonda de Campeche ofrece una configuración similar a la de la propia península en su litoral nor-occidental. Con una pendiente de aproximadamente 0,1%, presenta un escalón a 18 m de profundidad siguiendo una isóbata casi paralela a la línea de la costa a 18 km de ella.

Esta plataforma continental delimitando a la Sonda alcanza los 180 m de profundidad a una distancia aproximada de 150 km de la costa.

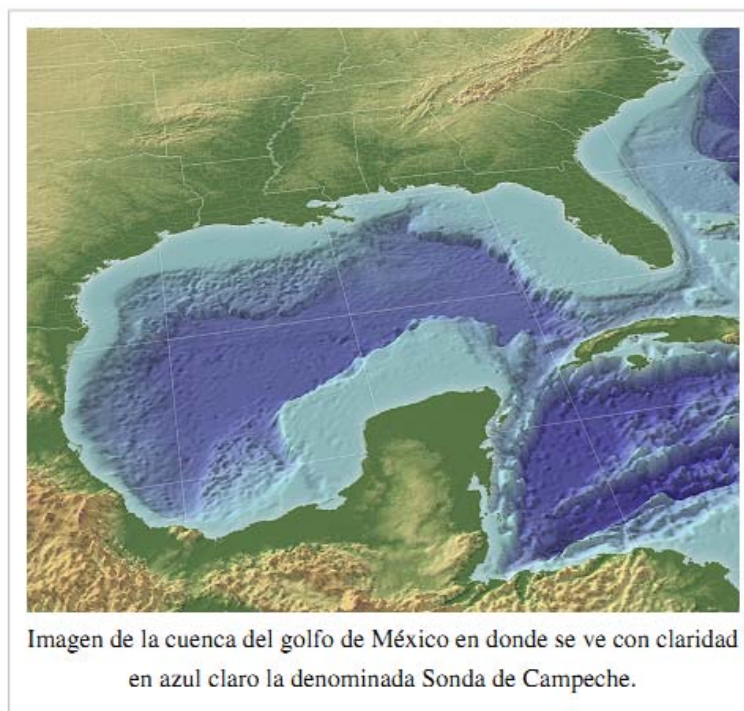


Fig. 3.3 Configuración de lo Sonda de Campeche

Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Sonda\\_de\\_Campeche](http://es.wikipedia.org/wiki/Sonda_de_Campeche), 2011

## Características

La Sonda es rica en recursos pesqueros. Cuba ha desarrollado amplios estudios de las corrientes marítimas que dominan la zona así como del potencial pesquero existente.

También, desde mediados del siglo XX, se ha venido explotando intensamente toda el área marítima comprendida dentro de la Sonda en lo que se refiere a sus recursos petroleros. Se ha instalado un gran número de plataformas para la perforación de pozos petrolíferos, obteniéndose abundantemente tanto el denominado crudo como el gas natural asociado. De las plataformas marítimas instaladas en la región se extrae en la actualidad aproximadamente las tres cuartas partes del petróleo que México exporta.

Para la exploración y explotación petrolera PEMEX se vale de un organismo Subsidiario denominado PEMEX EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN (PEP) el cual cuenta con dos Regiones Marinas Noreste y Suroeste para llevar a cabo dicha actividad.



Figura 3.4 .Se muestra el área de influencia de las Regiones Marinas de PEP

Fuente: <http://www.pep.pemex.com>, 2011

Según datos de PEMEX La sonda de Campeche junto con el Litoral de Tabasco producen 1,941,600 bpd de petróleo de los 2,570,000 bpd que se producen en el país, es decir el 76% de total <sup>(22)</sup>.

Según el informe anual de PEMEX 2011, en la Sonda de Campeche, PEP tiene cerca de 233 plataformas marítimas en las que viven permanentemente –rotándose, desde luego-alrededor de 15 mil personas; con frecuencia las instalaciones son verdaderos conjuntos modulares de varias plataformas, una principal y otras satélites, unidas por gigantescas tuberías que a la vez que sirven de estructuras para los puentes colgantes forman una notable geometría de ductos y conexiones cuyos vivos colores, en contraste con la gama de azules del mar, producen una especie de diseño surrealista.

La mayor parte de las plataformas marítimas tienen la función de extraer petróleo crudo y gas natural, que invariablemente surgen combinados. En algunos pozos predomina el líquido, pero siempre con algún porcentaje de gas; en otros, la composición es al revés. Esta característica geológica obliga a separar en las instalaciones oceánicas ambos tipos de hidrocarburos, para luego bombearlos hacia tierra firme, pues tienen dos destinos perfectamente diferenciados: el gas se concentra en la planta de rebombeo de Atasta en Campeche y el crudo en el puerto de Dos Bocas en Tabasco.

Estas plataformas de explotación (en las que llegan a vivir en cada una aproximadamente 300 personas) son estructuras metálicas sustentadas en pilotes incrustados en el lecho marino. Su parte inferior es un muelle y la superior un helipuerto. Cada plataforma cuenta con toda clase de servicios, desde los técnicos directamente vinculados con la producción y el mantenimiento, hasta los de apoyo y domésticos, como son los comedores.

Las plataformas son autosuficientes en alta medida: obtienen agua potable a través de plantas desaladoras de agua marina (las aguas negras son tratadas); tienen generadores eléctricos que funcionan con motores diesel; para abastecerse de equipos y servicios cuentan con barcos abastecedores.

Otro grupo de plataformas son de exploración, las cuales, precisamente por ello, no son plataformas fijas sino móviles, con patas Auto elevables que se apoyan en el fondo del mar, o con pontones que se llenan o vacían de agua por medio de bombeo, con un mecanismo similar al de los submarinos.

Un tercer grupo de plataformas son las de apoyo, tanto técnico para rebombeo en alta mar u otras necesidades como administrativo; tal es el caso de los Floteles, que alberga a cientos de trabajadores que laboran en las plataformas satélites y que diariamente son movidos por vía marítima.



Foto ilustrativa de las instalaciones petroleras propiedad de PEMEX en la Sonda de Campeche

Fuente: Propia

<sup>22</sup> Informe Anual de Labores de Petróleos Mexicanos, 2011. Capítulo II. Exploración y Producción

### 3.2 Filosofía de operación actual y propuesta

#### 3.2.1 Sistema de generación actual

Al proponer el proyecto en una área marina donde existen un sinnúmero de plataformas petroleras de producción se puede hacer uso de la energía generada por las turbinas eólicas para suministrarla a las plataformas petroleras y sustituir en gran medida al diesel como fuente principal de energía.

Actualmente las plataformas petroleras toman energía eléctrica proveniente de sistemas de generación de electricidad a base de motores a Diesel los cuales se encuentran en la misma instalación, generalmente son tres o cuatro motores por instalación.

Dichos sistemas proporcionan electricidad continua durante todas las operaciones y actividades cotidianas que lleva a cabo el personal que trabaja en las plataformas. La figura 4.5 muestra la filosofía de operación actual para la generación y suministro de energía eléctrica en las plataformas petroleras.

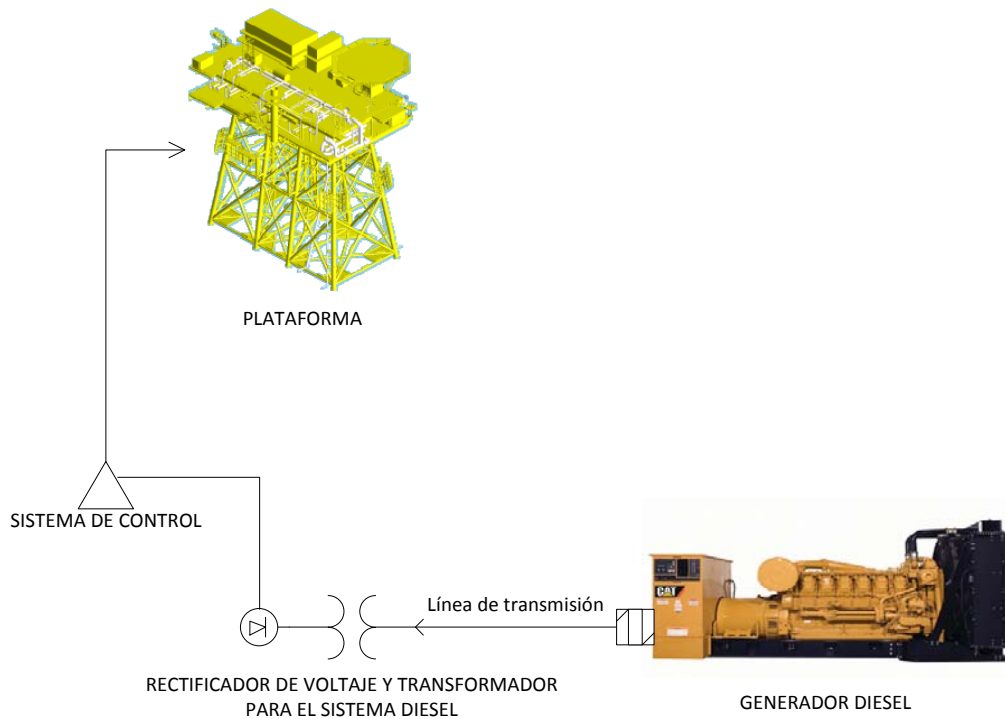


Figura 3.5. Filosofía de operación actual para el suministro de energía eléctrica en plataformas petroleras

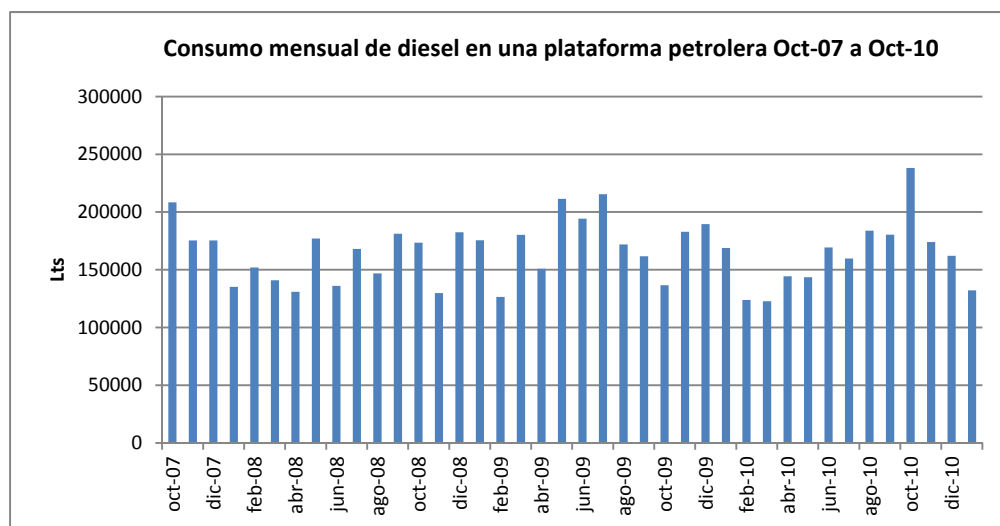
Fuente: Elaboración propia

#### Consumo promedio de energéticos

De datos estadísticos del consumo de diesel en una plataforma se obtiene la gráfica 3.1 y muestra el consumo mensual de diesel para cuatro máquinas generadoras en una plataforma petrolera el dato que se observa es de 165,000 lts lo cual da 55,000 lts por generador y un consumo anual promedio de 660,000 lts de diesel para cada generador.

Derivado de la demanda de energía en las plataformas PEMEX tiene un alto costo por consumo de Diesel y una emisión de gases de efecto de invernadero a la atmósfera. Por lo anterior se propone el uso de una turbina eólica para auxiliar en el suministro de energía eléctrica en las plataformas marinas.





Gráfica 3.1. Consumo mensual de diesel para 3 máquinas generadoras en una plataforma petrolera

Fuente: Elaboración propia con datos de la Base de datos del contrato equipo COSL-3, PEP

### Especificaciones de los generadores actuales

En la tabla 3.1 se muestran las especificaciones de un motor Caterpillar 3512B de 1360 hp y un generador de 1010 kW que se usan en las plataformas marinas para la generación de electricidad y en la tabla 3.2 se muestra el rendimiento del generador.

ESPECIFICACIONES DEL GENERADOR DIESEL CATERPILLAR 3512B		
Motor diesel V-12 de 4 tiempos	Sistema de enfriamiento..... 156.8 L (41.4 Gal)	
Cilindrada..... 51,75 L (3 157,98 pulg <sup>3</sup> )	Sistema de aceite lubricante.....613,2 L (162,0 gal)	
Velocidad nominal del motor.....1600	Intervalo de cambios de aceite..... 1.000 horas	
Calibre..... 170,0 mm (6,69 pulg)	Aceite de motor diesel Caterpillar 10W30 o 15W40	
Carrera.....190,0 mm (7,48 pulg)	<b>Colector de aceite de sumidero profundo</b>	
Aspiración.....Turbocomprimido-Posenfriado	Rotación (desde el extremo del volante).....A la izquierda	
Regulador.....Electrónico	Volante y caja del volante..... SAE NO. 00	
Sistema de enfriamiento..... Intercambiador de calor	Dientes del volante..... 183	
Peso neto seco (aprox.).....7 302 kg (16 098 lb)	<b>Emissions (Nominal)</b>	
	NOx g/hp-hr	9.4 g/hp-hr
	CO g/hp-hr	0.94 g/hp-hr
	HC g/hp-hr	0.27 g/hp-hr
	PM g/hp-hr	0.144 g/hp-hr

Tabla 3.1. Especificaciones del generador Caterpillar 3512B



De la tabla 3.3 de rendimiento proporcionado por el fabricante, el consumo promedio anual de un motor diesel de 1000 HP con un generador acoplado de 1000 KW es de 1752000 lts de diesel a una carga constante de 75%.

General Performance Data						
Generator eKW/eKW	Percent Load	Engine Power Bhp/BKW	Fuel Rate Lb/hp/hr - G/BKW_HR	Fuel Rate Gal/hr LPH	Intake Air Flow CFM - M3/MIN	Exh Gas Flow CFM - M3/MIN
103	10.0	153.7 (114.6)	.528 (321.3)	11.59 (43.9)	1,052.4 (29.8)	1,988.2 (56.3)
206	20.0	303.2 (226.1)	.411 (249.9)	17.794 (67.4)	1,207.8 (34.2)	2,535.6 (71.8)
257.5	25.0	376.6 (280.8)	.389 (236.8)	20.935 (79.3)	1,303.1 (36.9)	2,832.2 (80.2)
309	30.0	449 (334.8)	.378 (230)	24.235 (91.8)	1,437.3 (40.7)	3,188.9 (90.3)
412	40.0	590.9 (440.6)	.364 (221.6)	30.73 (116.4)	1,702.2 (48.2)	3,884.6 (110)
515	50.0	729.2 (543.8)	.356 (216.6)	37.066 (140.4)	1,960 (55.5)	4,562.7 (129.2)
618	60.0	871.4 (649.8)	.349 (212.5)	43.454 (164.6)	2,214.2 (62.7)	5,226.6 (148)
721	70.0	1,014.1 (756.2)	.344 (209.5)	49.843 (188.8)	2,454.4 (69.5)	5,876.4 (166.4)
772.5	75.0	1,085.8 (809.7)	.342 (208.3)	53.064 (201)	2,567.4 (72.7)	6,197.7 (175.5)
824	80.0	1,157.6 (863.2)	.341 (207.2)	56.311 (213.3)	2,673.3 (75.7)	6,515.6 (184.5)
927	90.0	1,301.9 (970.8)	.338 (205.9)	62.911 (238.3)	2,846.4 (80.6)	7,144.2 (202.3)
1,030	100.0	1,447.9 (1,079.7)	.337 (205.2)	69.722 (264.1)	3,012.3 (85.3)	7,779.8 (220.3)

Tabla 3.3. Rendimiento del generador

Fuente: Base de datos del contrato de plataforma COSL-3, PEP

De los datos mostrados se obtiene el rendimiento promedio de los generadores usados actualmente, dichos datos se utilizarán más adelante para realizar la evaluación económica de la generación de electricidad usando aerogeneradores y comparando el esquema actual con el propuesto para determinar si la energía eólica es rentable para este proyecto.

### 3.2.2 Filosofía de operación propuesta

En la figura 3.6 se muestra la filosofía de operación propuesta para el sistema eólico, como se observa se propone contar con ambos generadores, es decir un sistema híbrido eólico – diesel, los cuales han sido probados y evaluados para aplicaciones de electrificación rural y en Industrias y procesos específicos <sup>(23)</sup>.

Se propone esta filosofía de operación a fin de que ambos sistemas se complementen, ya que los vientos en el área no son constantes y en algunos momentos durante el año el sistema eólico no tendrá capacidad de generación debido a la baja velocidad del viento que se pudiera presentar.

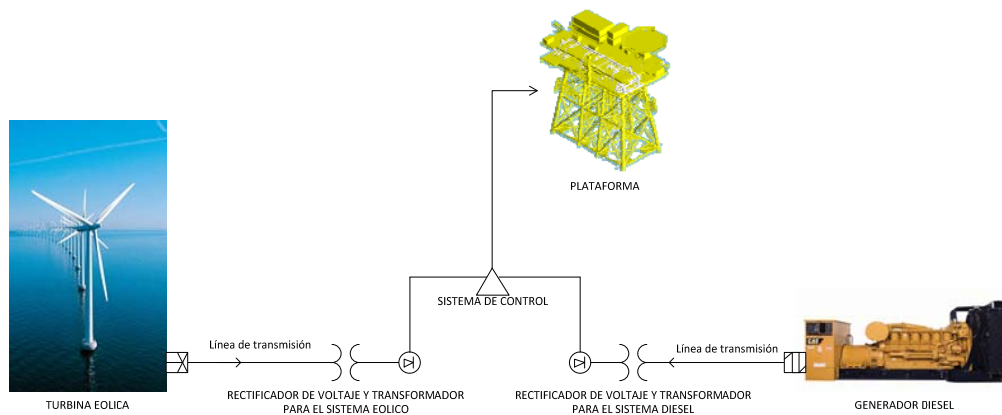


Figura 3.6. Filosofía de operación propuesta para el sistema eólico. Fuente: Elaboración propia

El sistema que se propone sería de apoyo y no sustituye a los generadores diesel pero ayudaría a ahorrar a PEMEX en combustible y dejar de emitir parte de los gases de efecto de invernadero a la atmósfera.

Se abarcaría a los sistemas no críticos a fin de asegurar que los equipos críticos del sistema de producción no se vean afectados en caso de que la velocidad del viento sea menor a la necesaria para la generación de la energía suficiente, así se suministraría la energía a los complejos habitacionales y componentes de apoyo en las plataformas petroleras.

Cuando la velocidad del viento sea adecuada para la generación de electricidad con el sistema eólico, el sistema de control apagará los generadores diesel y usará la energía generada por la turbina y hará lo contrario en caso de que la velocidad del viento no sea la adecuada o mantendrá los dos sistemas encendidos utilizando la mayor cantidad de energía eólica posible y en menor medida la de los generadores diesel.

Si bien el esquema actual de generación ha funcionado bien durante mucho tiempo, el esquema propuesto da una oportunidad a una empresa netamente petrolera de convertirse en una empresa energética al combinar sus procesos y usar fuentes de energía renovable y limpias en sus operaciones cotidianas. Algunas grandes empresas multinacionales como British Petroleum y Shell ya han invertido en energía solar y eólica pasando a ser empresas energéticas.

Comúnmente la sociedad percibe a las empresas petroleras como altamente contaminantes y depredadoras del medio ambiente, al convertirse a una empresa energética, la percepción de la sociedad cambia, posicionando a la empresa como una entidad preocupada y comprometida con el cuidado del medio ambiente.

### 3.3 Información meteorológica

Para desarrollar sus actividades de forma segura PEMEX EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN cuenta con estaciones meteorológicas, distribuidas en diferentes puntos de interés en las Regiones Marinas, para la recolección de datos y posterior pronósticos climatológicos, dichas estaciones sensan cada minuto durante las 24 hrs del día y los 365 días al año.

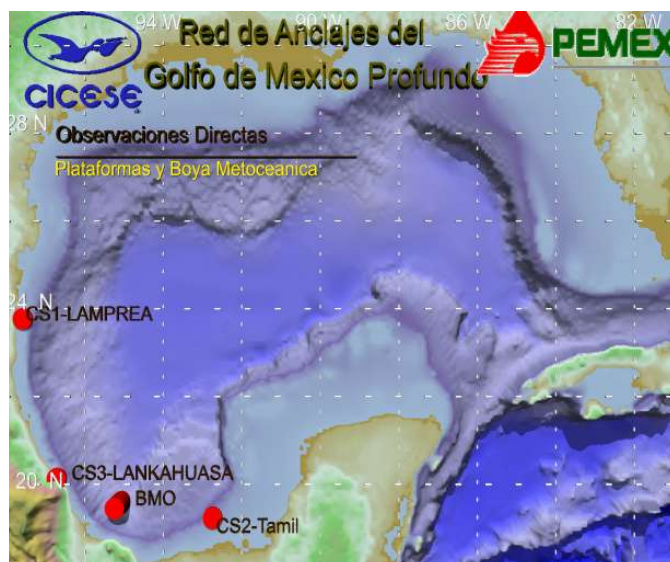


Figura 3.7. Ilustrativa que muestra las estaciones de monitores climatológica de PEP, Fuente: [www.pep.pemex.com](http://www.pep.pemex.com), 2011

### 3.3.1 Área de estudio

Las estaciones meteorológicas de las cuales se cuenta con información se enlistan a continuación: Ixtoc – A, Eco – 1, Cayo Arcas, Carmen, Ku – H, Rebombeo y Dos Bocas.

La figura 3.7b, muestra la base de datos actual de las instalaciones petroleras en las Regiones Marinas de PEP y la figura 3.7c, muestra la ubicación de las estaciones mencionadas y el área de estudio.

Como se muestra en las figuras el área de estudio es extensa y con toda la información meteorológica disponible se podría elaborar un mapa eólico detallado que proporcione datos del potencial eólico más exactos.

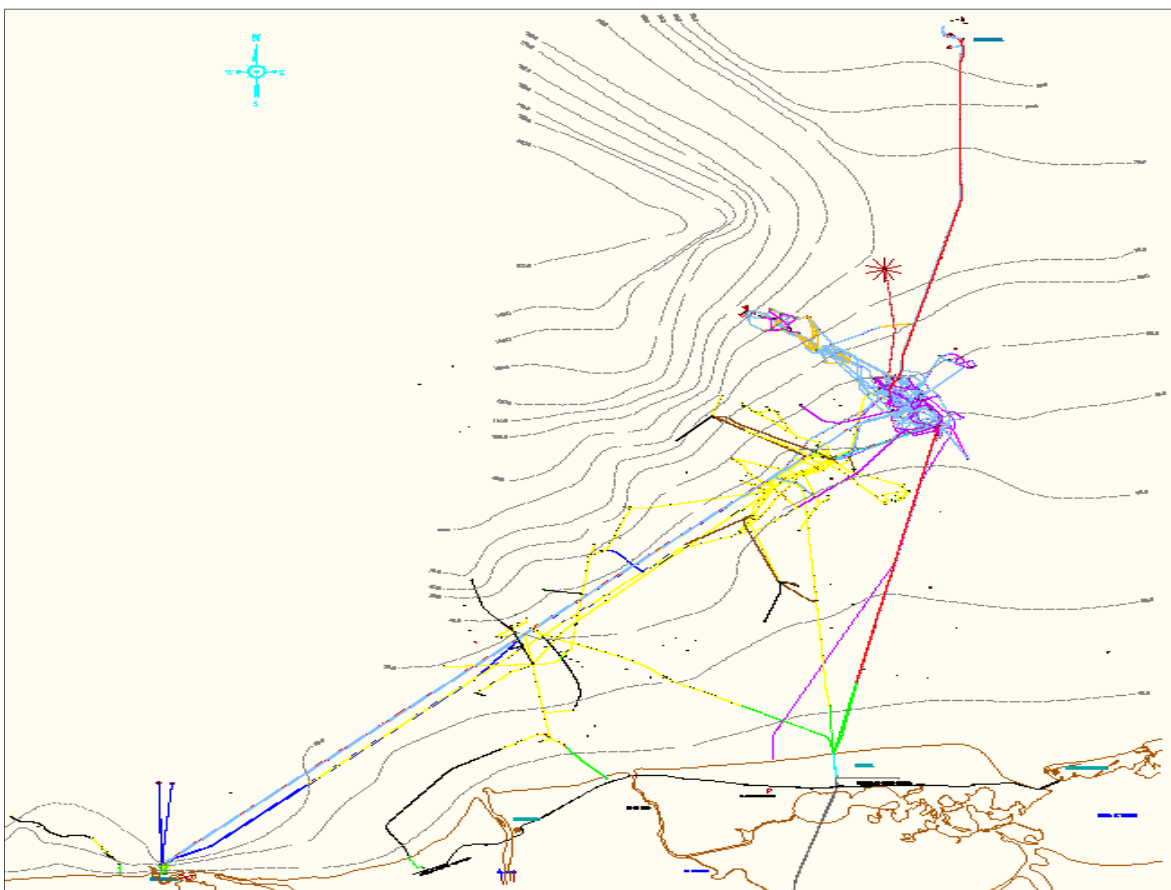


Fig. 3.7b. Instalaciones petroleras de las Regiones Marinas de PEP. Fuente: Base de datos de Ductos y Plataformas PEP, 2011

La tabla siguiente muestra las coordenadas geográficas UTM de las estaciones de monitoreo meteorológico, estas están referidas a la zona geográfica 15 N para México.

Estación	X	Y
IXTOC - A	582769	2145943
KU - H	583934	2166234
ECO - 1	603390	2104290
REBOMBEO	540049	2094702
CAYO ARCAS	608368	2229828
CARMEN	623319	2061906
DOS BOCAS	481399	2038787

Coordenadas Geográficas, UTM para la zona 15N de México, de las estaciones de monitoreo Meteorológico

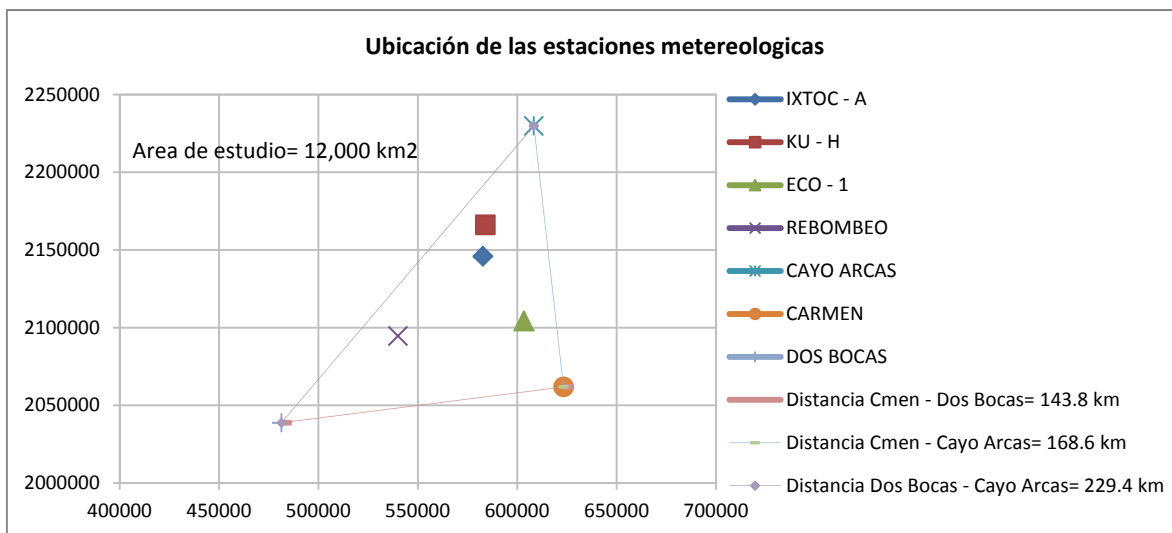


Fig. 3.7c. Ubicación y Área de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos de PEP

Para la evaluación del potencial eólico, se toman los datos que comprenden del 01 de enero de 2006 al 31 de diciembre de 2010 y se determinan sus datos estadísticos. Sin embargo para una caracterización más detallada se puede utilizar la información de las seis estaciones mencionadas y así obtener una malla más exacta de la distribución de los vientos en el área.

### 3.3.2 Presentación de datos meteorológicos

A continuación se muestran el arreglo de los datos obtenidos para la evaluación del modelo.

Dato de tiempo	Vel viento (km/hr)	Rachas (km/hr)	Direccion (grad)	Temp aire (°C)	Humedad relativa (%)	Presión atmosférica (mbar)	Precipitación (mm)	Visibilidad (km)
2006.01.01-00:00	28.53	32.45	71.37	23.43	87.65	1014.76	0.20	3.00
2006.01.01-00:01	27.69	30.21	69.62	23.43	88.17	1014.76	0.00	3.00
2006.01.01-00:02	29.09	32.45	70.32	23.34	88.17	1014.76	0.00	3.00
2006.01.01-00:03	29.37	32.45	69.97	23.34	88.17	1014.76	0.00	3.00
2006.01.01-00:04	31.33	33.57	68.91	23.34	88.17	1014.60	0.00	3.00
2006.01.01-00:05	32.17	33.57	69.97	23.34	87.65	1014.60	0.00	3.00
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
2010.12.31-23:57	29.99	32.44	136.64	24.76	1009.34	86.48	0.00	3.00
2010.12.31-23:58	29.99	33.52	137.00	24.76	1009.34	86.48	0.00	3.00

Tabla 3.4 Información meteorológica para la estación Eco – 1

Fuente: Base de datos meteorológicos de PEP, 2010

Los sensores toman datos a cada minuto para nueve variables diferentes lo cual representa 525,600 datos para cada variable en un año y un total de 4730000 datos para las nueve variables si contamos con información de cinco años tenemos un total de 23652000 datos que se tienen que procesar.

Dichos sensores se encuentran generalmente a 40 m del nivel del mar por lo que se tendrá que efectuar la corrección al momento de estimar la energía para la altura que se encuentre el eje de la turbina eólica.

<sup>23</sup> Amador Guerra, Julio. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS TÉCNICOS EN LA APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA A LA INTEGRACIÓN REGIONAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN LA PRODUCCIÓN DESCENTRALIZADA DE ELECTRICIDAD. Tesis Doctoral, Madrid España 2000.

La imagen siguiente muestra otra forma en que el sistema nos puede presentar los datos de forma puntual.

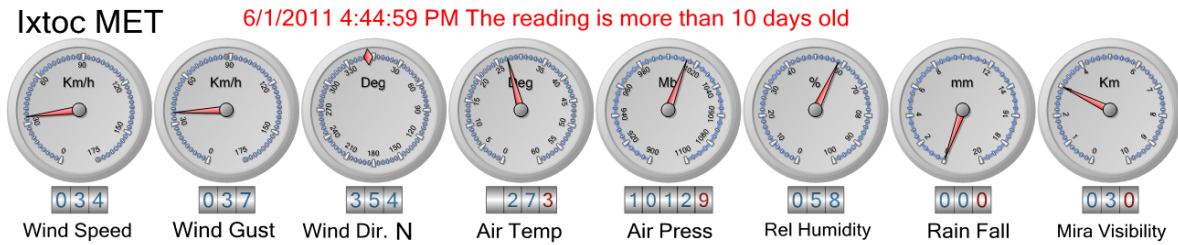


Figura 3.8. Presentación de datos meteorológicos de la estación Ixtoc – A

Fuente: [www.pep.pemex.com](http://www.pep.pemex.com), 2011

### 3.4 Procesado estadístico de datos

En el capítulo tres se analizó los métodos estadísticos para el manejo de la información de velocidades del viento, se observó que cuando se tienen suficientes datos, se puede aplicar la distribución de Weibull para ajustar los datos.

En el siguiente punto se procesa la información y se observa que los datos se ajustan muy bien a la distribución antes mencionada. Sin embargo, para el cálculo de la energía, se utiliza la información dura ya que se cuenta con datos cada minuto de 6 años a la fecha.

Derivado de la densidad de los datos meteorológicos con que se cuenta se utilizó un software para el manejo estadístico de la información, a continuación se presenta el resumen de los datos obtenidos después del procesado.

Como se mencionó anteriormente se debe efectuar la corrección por altura de la velocidad del viento, mediante la ecuación de Hellmann, vista en el capítulo 2, para esto se considera que las velocidades son medidas a 40 m sobre el nivel del mar (SNM) y los ejes de las turbinas estarán instalados a 80 m SNM.

Dónde:

$$V_h = V_0 \left( \frac{h}{h_0} \right)^\alpha$$

$V_h$  es la velocidad del viento a la altura "h"

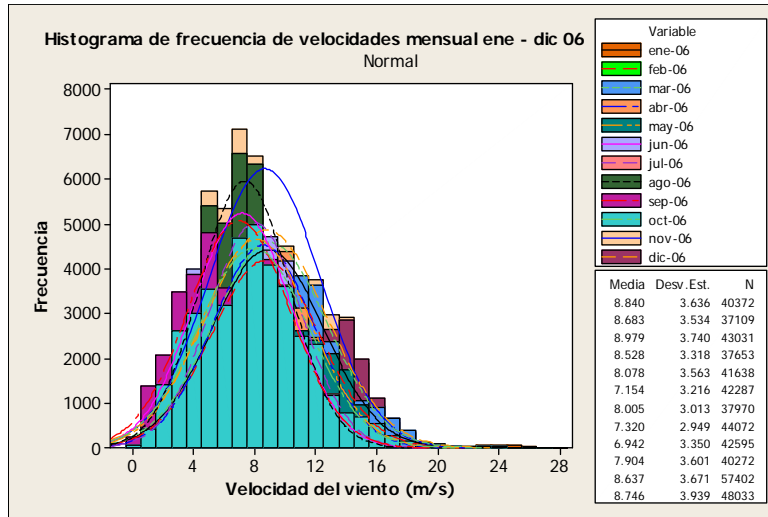
$V_0$  es la velocidad medida del viento a la altura  $h_0$

$\alpha$  es el exponente de Hellmann que varía con la rugosidad del terreno y cuyos valores se muestran en la tabla 2.1

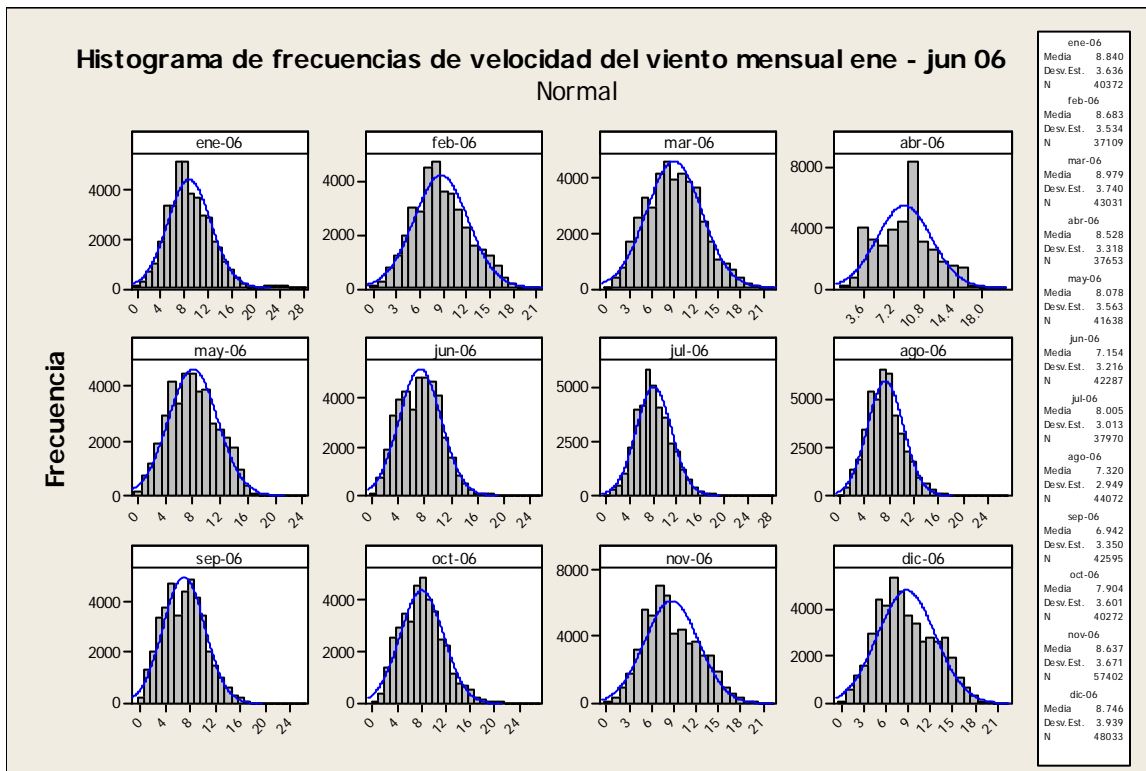
Los resultados se muestran en las siguientes tablas y gráficas para los años 2006 al 2010 y ya se encuentran corregidos por la altura.

### 3.4.1 Datos meteorológicos de 2006

Resumen de datos 2006_mensual			
Fecha	Media	Desv. Est	Muestra (N)
ene-06	8.840	3.636	40372
feb-06	8.683	3.534	37109
mar-06	8.979	3.740	43031
abr-06	8.528	3.318	37653
may-06	8.078	3.563	41638
jun-06	7.154	3.216	42287
jul-06	8.005	3.013	37970
ago-06	7.320	2.949	44072
sep-06	6.942	3.350	42595
oct-06	7.904	3.601	40272
nov-06	8.637	3.671	57402
dic-06	8.746	3.939	48033

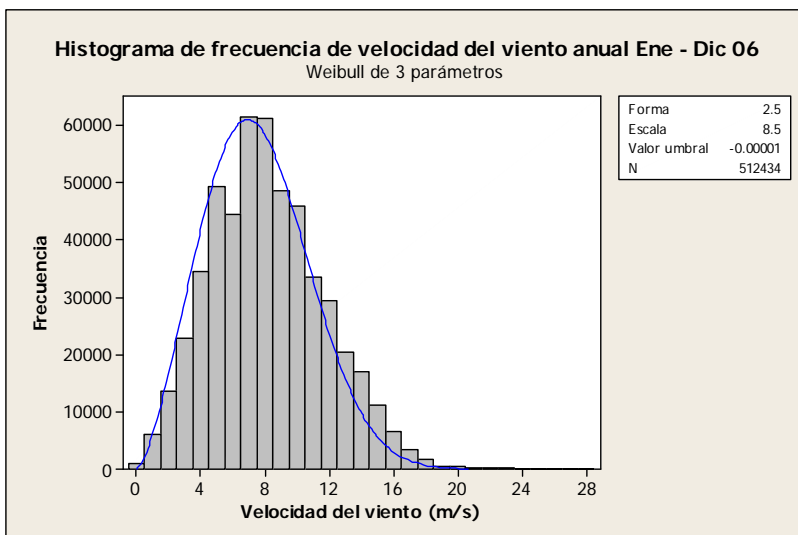


Histograma de frecuencia de velocidad del viento mensual para 2006



Histograma de frecuencias de velocidad del viento mensual para 2006

Fuente: Elaboración propia



Histograma de frecuencia de velocidad del viento anual para 2006

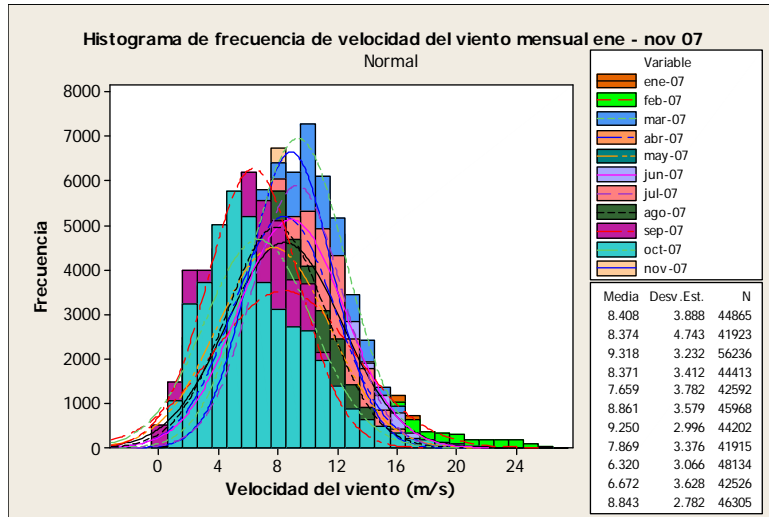
Distribución de frecuencias para 2006				
Intervalo (m/s)	Frec (min)	Frec (Hrs)	%	
0	0.5	852	14.2	0.2
0.5	1.5	6013	100.2	1.2
1.5	2.5	13478	224.6	2.6
2.5	3.5	22863	381.1	4.5
3.5	4.5	34521	575.4	6.7
4.5	5.5	49210	820.2	9.6
5.5	6.5	44259	737.7	8.6
6.5	7.5	61289	1021.5	12.0
7.5	8.5	61096	1018.3	11.9
8.5	9.5	48461	807.7	9.5
9.5	10.5	45743	762.4	8.9
10.5	11.5	33430	557.2	6.5
11.5	12.5	29362	489.4	5.7
12.5	13.5	20354	339.2	4.0
13.5	14.5	16971	282.9	3.3
14.5	15.5	11031	183.9	2.2
15.5	16.5	6501	108.4	1.3
16.5	17.5	3490	58.2	0.7
17.5	18.5	1785	29.8	0.3
18.5	19.5	554	9.2	0.1
19.5	20.5	415	6.9	0.1
20.5	21.5	240	4.0	0.0
21.5	22.5	136	2.3	0.0
22.5	23.5	142	2.4	0.0
23.5	24.5	115	1.9	0.0
24.5	25.5	67	1.1	0.0
25.5	26.5	33	0.6	0.0
26.5	27.5	16	0.3	0.0
27.5	28.5	7	0.1	0.0
<b>Total =</b>	<b>512434</b>	<b>8541</b>	<b>100.0</b>	

Tabla resumen de datos meteorológicos Ene - Dic 2006				
Fecha	Temp aire (°C)	Hum relat (%)	Presión atm (mBar)	Velocidad del Viento (m/s)
ene-06	21.32	76.28	1013.84	8.84
feb-06	21.04	75.99	1016.34	8.68
mar-06	23.76	77.51	1013.65	8.98
abr-06	26.31	76.48	1011.80	8.53
may-06	25.35	76.70	1011.19	8.08
jun-06	25.40	79.39	1012.47	7.15
jul-06	28.73	80.10	1013.68	8.01
ago-06	28.77	80.77	1012.84	7.32
sep-06	28.66	78.93	1012.22	6.94
oct-06	27.38	78.74	1012.06	7.90
nov-06	25.49	75.91	1015.73	8.64
dic-06	24.05	84.61	1015.91	8.75

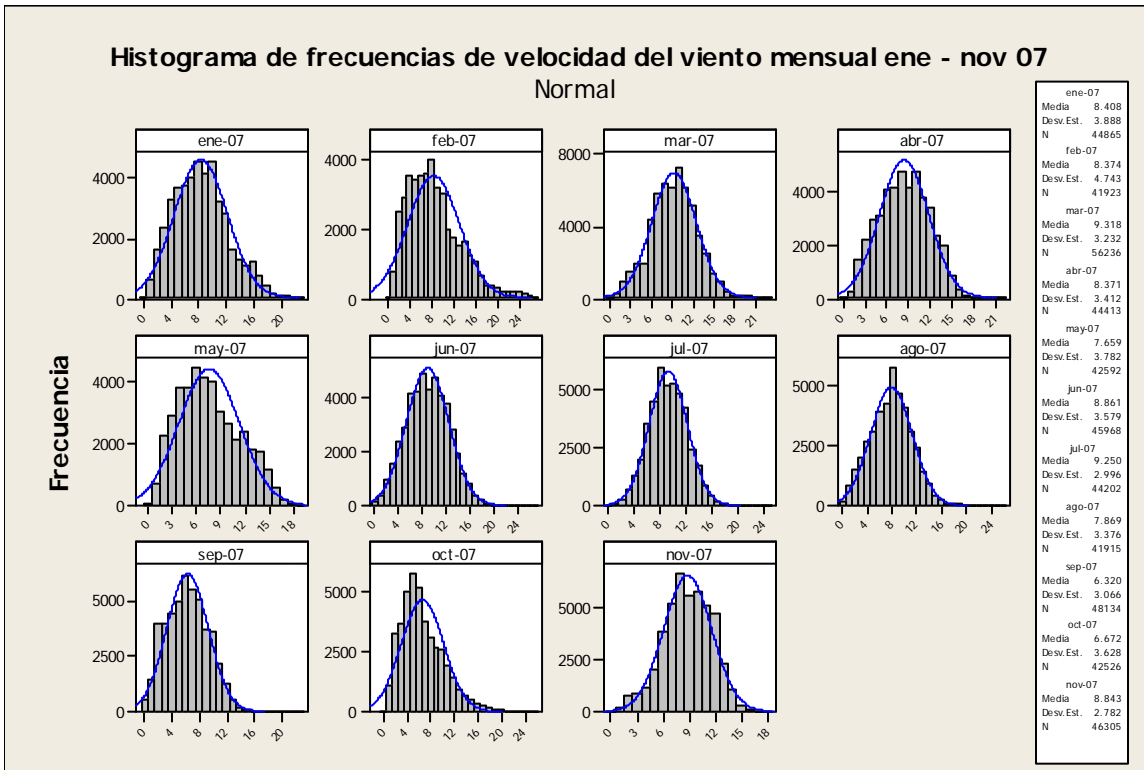
Fuente: Elaboración propia

### 3.4.2 Datos meteorológicos de 2007

Resumen de datos 2007_mensual			
Fecha	Media	Desv Est.	Muestra (N)
ene-07	8.408	3.888	44865
feb-07	8.374	4.743	41923
mar-07	9.318	3.232	56236
abr-07	8.371	3.412	44413
may-07	7.659	3.782	42592
jun-07	8.861	3.579	45968
jul-07	9.250	2.996	44202
ago-07	7.869	3.376	41915
sep-07	6.320	3.066	48134
oct-07	6.672	3.628	42526
nov-07	8.843	2.782	46305



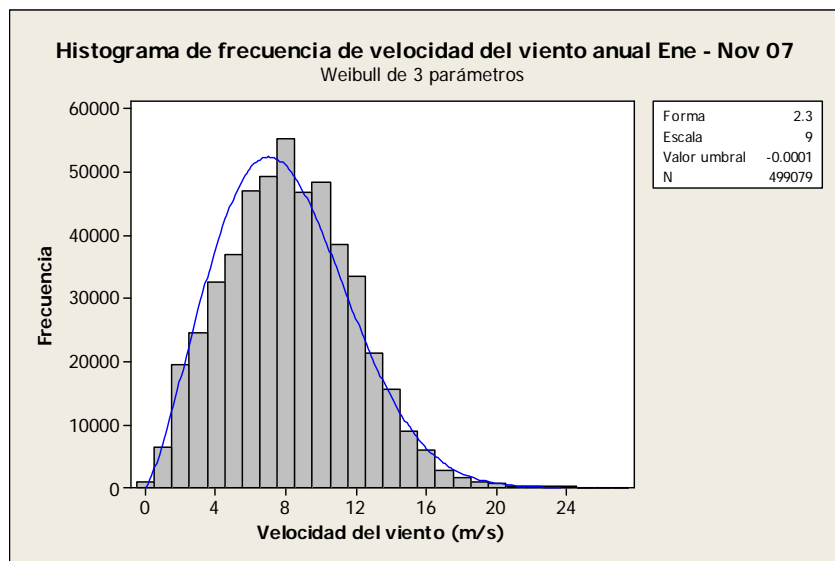
Histograma de frecuencia de velocidad del viento mensual para 2007



Histograma de frecuencias de velocidad del viento mensual para 2007

Fuente: Elaboración propia





Histograma de frecuencia de velocidad del viento anual para 2007

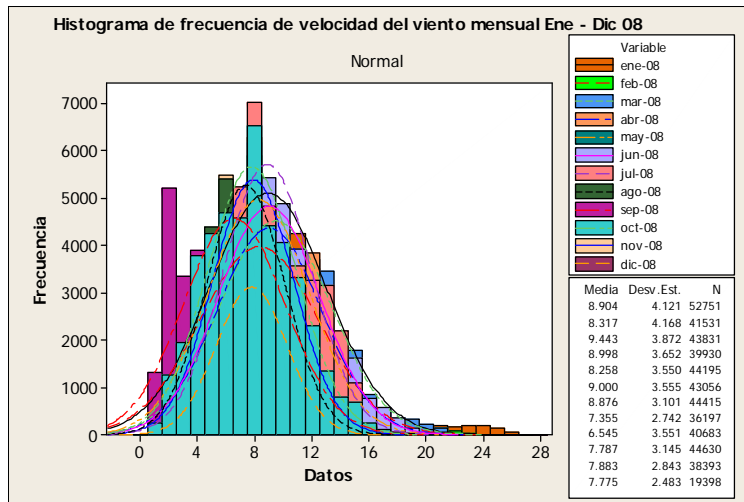
Distribución de frecuencias para 2007				
Intervalo (m/s)	Frecuencia (min)	Frec (Hrs)	%	
0	0.5	1001	16.7	0.2
0.5	1.5	6407	106.8	1.3
1.5	2.5	19433	323.9	3.9
2.5	3.5	24632	410.5	4.9
3.5	4.5	32549	542.5	6.5
4.5	5.5	36911	615.2	7.4
5.5	6.5	47077	784.6	9.4
6.5	7.5	49300	821.7	9.9
7.5	8.5	55424	923.7	11.1
8.5	9.5	46933	782.2	9.4
9.5	10.5	48581	809.7	9.7
10.5	11.5	38596	643.3	7.7
11.5	12.5	33511	558.5	6.7
12.5	13.5	21295	354.9	4.3
13.5	14.5	15572	259.5	3.1
14.5	15.5	8932	148.9	1.8
15.5	16.5	5980	99.7	1.2
16.5	17.5	2800	46.7	0.6
17.5	18.5	1582	26.4	0.3
18.5	19.5	858	14.3	0.2
19.5	20.5	602	10.0	0.1
20.5	21.5	315	5.3	0.1
21.5	22.5	253	4.2	0.1
22.5	23.5	199	3.3	0.0
23.5	24.5	178	3.0	0.0
24.5	25.5	109	1.8	0.0
25.5	26.5	43	0.7	0.0
26.5	27.5	6	0.1	0.0
<b>Total =</b>	<b>499079</b>	<b>8318.0</b>	<b>100.0</b>	

Datos meteorológicos Ene - Nov 2007				
	Temp aire (°C)	Hum Relat (%)	P atm (mBar)	Vel Viento (m/s)
ene-07	23.60	83.36	1016.12	8.41
feb-07	23.60	81.48	1014.19	8.37
mar-07	24.15	79.97	1014.61	9.32
abr-07	25.88	76.62	1011.44	8.37
may-07	27.68	76.90	1011.73	7.66
jun-07	28.60	77.97	1012.01	8.86
jul-07	28.63	77.87	1013.10	9.25
ago-07	28.49	56.55	1012.14	7.87
sep-07	27.77	81.37	1011.22	6.32
oct-07	28.69	18.21	1012.21	6.67
nov-07	26.12	69.60	1016.22	8.84

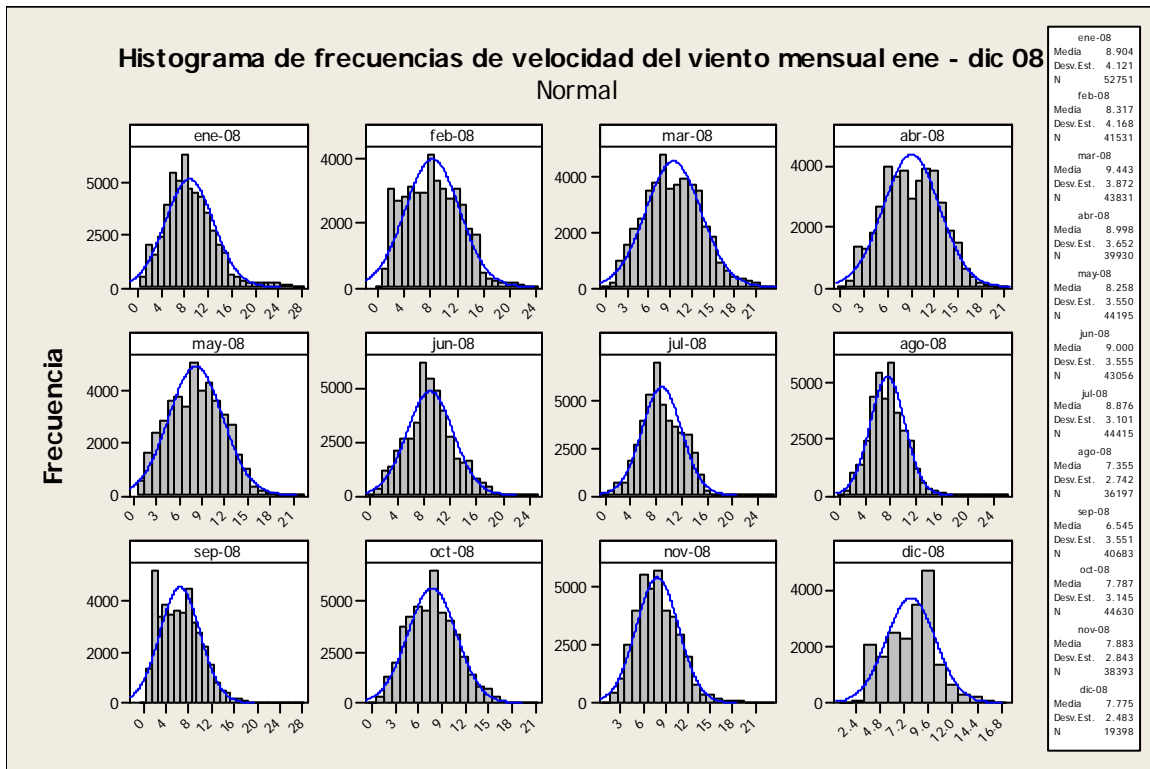
Fuente: Elaboración propia

### 3.4.3 Datos meteorológicos de 2008

Resumen de datos 2008_mensual			
Fecha	Media	Desviación Estándar	Muestra (N)
ene-08	8.904	4.121	52751
feb-08	8.317	4.168	41531
mar-08	9.443	3.872	43831
abr-08	8.998	3.652	39930
may-08	8.258	3.550	44195
jun-08	9.000	3.555	43056
jul-08	8.876	3.101	44415
ago-08	7.355	2.742	36197
sep-08	6.545	3.551	40683
oct-08	7.787	3.145	44630
nov-08	7.883	2.843	38393
dic-08	7.775	2.483	19398

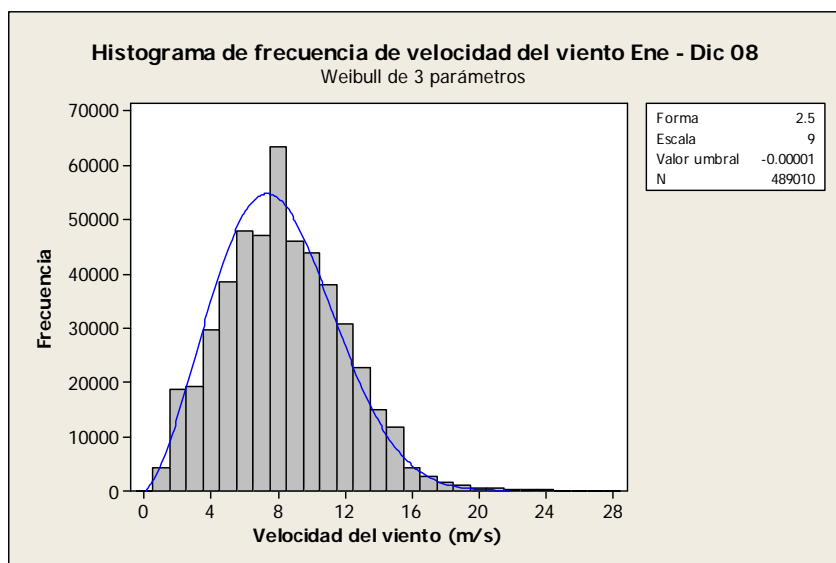


Histograma de frecuencia de velocidad del viento mensual para 2008



Histograma de frecuencias de velocidad del viento mensual para 2008

Fuente: Elaboración propia



Histograma de frecuencia de velocidad del viento para 2008

Fuente: Elaboración propia

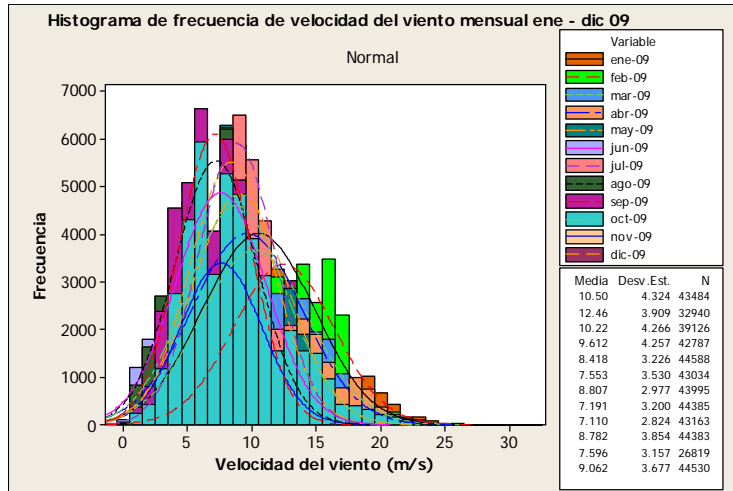
Distribución de frecuencias para 2008				
Intervalo (m/s)	Frecuencia (min)	Frec (Hrs)	%	
0	0.5	20	0.3	0.0
0.5	1.5	4157	69.3	0.9
1.5	2.5	18675	311.3	3.8
2.5	3.5	19409	323.5	4.0
3.5	4.5	29820	497.0	6.1
4.5	5.5	38608	643.5	7.9
5.5	6.5	47854	797.6	9.8
6.5	7.5	47026	783.8	9.6
7.5	8.5	63425	1057.1	13.0
8.5	9.5	46033	767.2	9.4
9.5	10.5	43836	730.6	9.0
10.5	11.5	38085	634.8	7.8
11.5	12.5	30750	512.5	6.3
12.5	13.5	22663	377.7	4.6
13.5	14.5	15058	251.0	3.1
14.5	15.5	11803	196.7	2.4
15.5	16.5	4317	72.0	0.9
16.5	17.5	2761	46.0	0.6
17.5	18.5	1594	26.6	0.3
18.5	19.5	1023	17.1	0.2
19.5	20.5	659	11.0	0.1
20.5	21.5	524	8.7	0.1
21.5	22.5	270	4.5	0.1
22.5	23.5	234	3.9	0.0
23.5	24.5	195	3.3	0.0
24.5	25.5	131	2.2	0.0
25.5	26.5	68	1.1	0.0
26.5	27.5	8	0.1	0.0
27.5	28.5	4	0.1	0.0
<b>Total =</b>	<b>489010</b>	<b>8150.2</b>	<b>100.0</b>	

Datos meteorológicos Ene - Dic 2008				
Fecha	Temp aire (°C)	Hum relat (%)	P atm (mBar)	Vel Viento (m/s)
ene-08	24.62	82.21	1016.12	8.90
feb-08	25.46	84.35	1014.30	8.32
mar-08	24.02	80.02	1013.90	9.44
abr-08	27.19	82.70	1011.84	9.00
may-08	24.92	84.67	1009.22	8.26
jun-08	31.87	86.05	1012.21	9.00
jul-08	29.30	84.21	1012.97	8.88
ago-08	29.68	83.08	1010.96	7.36
sep-08	29.77	82.52	1010.03	6.55
oct-08	28.05	75.72	1014.53	7.79
nov-08	25.66	73.95	1016.91	7.88
dic-08	24.14	88.50	1014.21	7.78

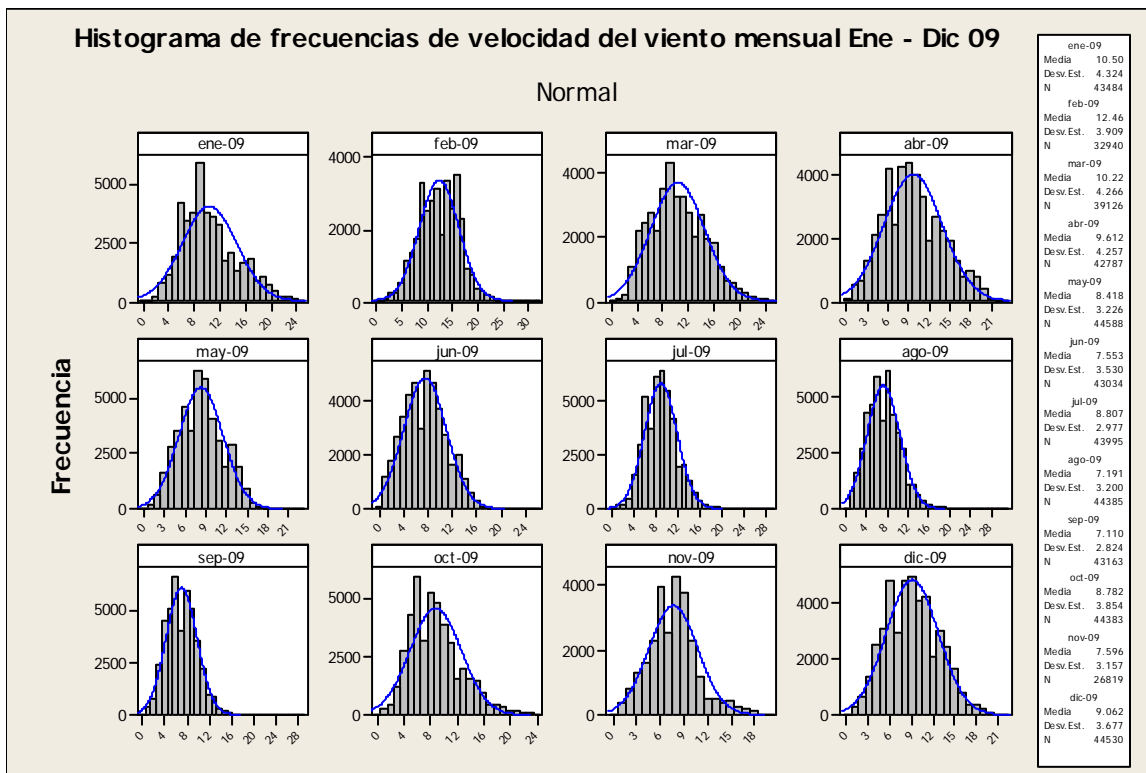
Fuente: Elaboración propia

3.4.4 Datos meteorológicos de 2009

Resumen de datos 2009_mensual			
Fecha	Medi a	Desviación Estándar	Muestra (N)
ene-09	10.50	4.324	43484
feb-09	12.46	3.909	32940
mar-09	10.22	4.266	39126
abr-09	9.61	4.257	42787
may-09	8.42	3.226	44588
jun-09	7.55	3.530	43034
jul-09	8.81	2.977	43995
ago-09	7.19	3.200	44385
sep-09	7.11	2.824	43163
oct-09	8.78	3.854	44383
nov-09	7.60	3.157	26819
dic-09	9.06	3.677	44530

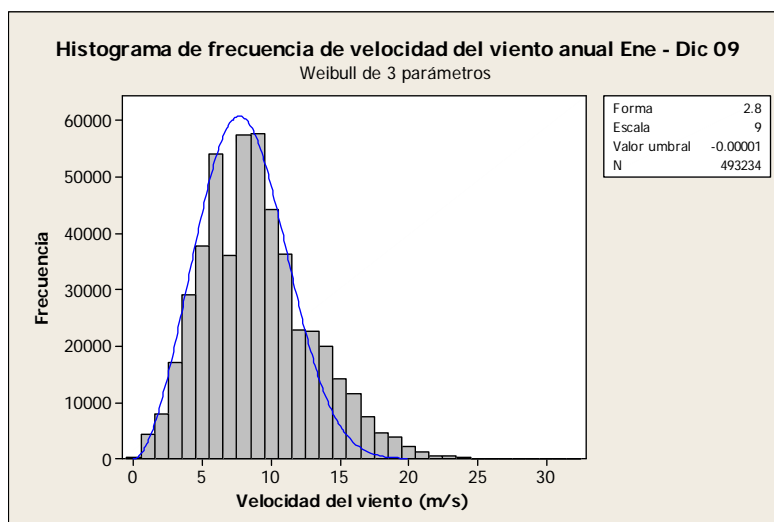


Histograma de frecuencia de velocidad del viento mensual para 2009



Histograma de frecuencias de velocidad del viento mensual para 2009

Fuente: Elaboración propia



Histograma de frecuencia de velocidad del viento anual para 2009

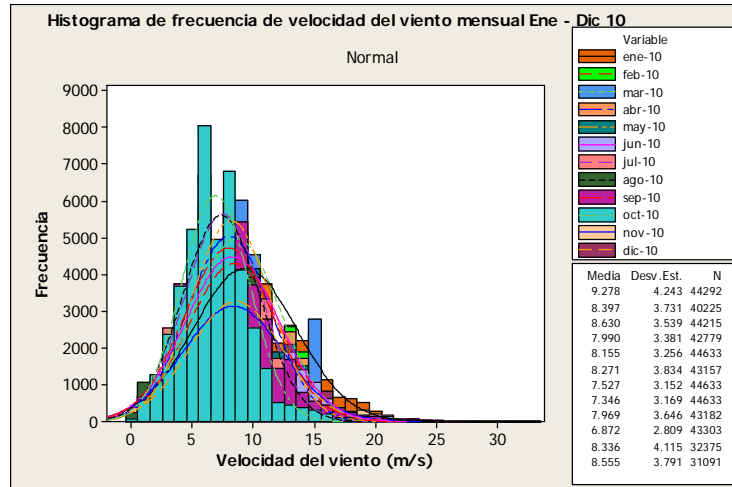
Distribución de frecuencias para 2009				
Intervalo (m/s)	Frec (min)	Frec (Hrs)	%	
0	0.5	281	4.7	0.1
0.5	1.5	4273	71.2	0.9
1.5	2.5	7980	133.0	1.6
2.5	3.5	17021	283.7	3.5
3.5	4.5	29139	485.7	5.9
4.5	5.5	37734	628.9	7.7
5.5	6.5	54009	900.2	10.9
6.5	7.5	36124	602.1	7.3
7.5	8.5	57416	956.9	11.6
8.5	9.5	57719	962.0	11.7
9.5	10.5	44161	736.0	9.0
10.5	11.5	36325	605.4	7.4
11.5	12.5	22730	378.8	4.6
12.5	13.5	22583	376.4	4.6
13.5	14.5	19858	331.0	4.0
14.5	15.5	14064	234.4	2.9
15.5	16.5	11429	190.5	2.3
16.5	17.5	7371	122.9	1.5
17.5	18.5	4550	75.8	0.9
18.5	19.5	3824	63.7	0.8
19.5	20.5	2102	35.0	0.4
20.5	21.5	1243	20.7	0.3
21.5	22.5	567	9.5	0.1
22.5	23.5	459	7.7	0.1
23.5	24.5	165	2.8	0.0
24.5	25.5	45	0.8	0.0
25.5	26.5	23	0.4	0.0
26.5	27.5	14	0.2	0.0
27.5	28.5	14	0.2	0.0
28.5	29.5	6	0.1	0.0
29.5	30.5	3	0.1	0.0
30.5	31.5	1	0.0	0.0
31.5	32.5	1	0.0	0.0
<b>Total =</b>	<b>493234</b>	<b>8220.6</b>	<b>100.0</b>	

Datos meteorológicos Ene - Dic 2009				
Fecha	Temp aire (°C)	Hum Relat (%)	P atm (mBar)	Vel Viento (m/s)
ene-09	22.73	81.13	1017.12	10.50
feb-09	22.25	81.86	1017.36	12.46
mar-09	23.00	79.34	1014.97	10.22
abr-09	24.72	78.13	1012.04	9.61
may-09	26.05	80.18	1010.69	8.42
jun-09	26.35	84.29	1011.73	7.55
jul-09	26.47	81.44	1013.39	8.81
ago-09	26.24	82.32	1013.11	7.19
sep-09	26.55	82.96	1011.29	7.11
oct-09	26.20	79.63	1010.78	8.78
nov-09	23.72	75.59	1011.75	7.60
dic-09	22.93	82.38	1013.42	9.06

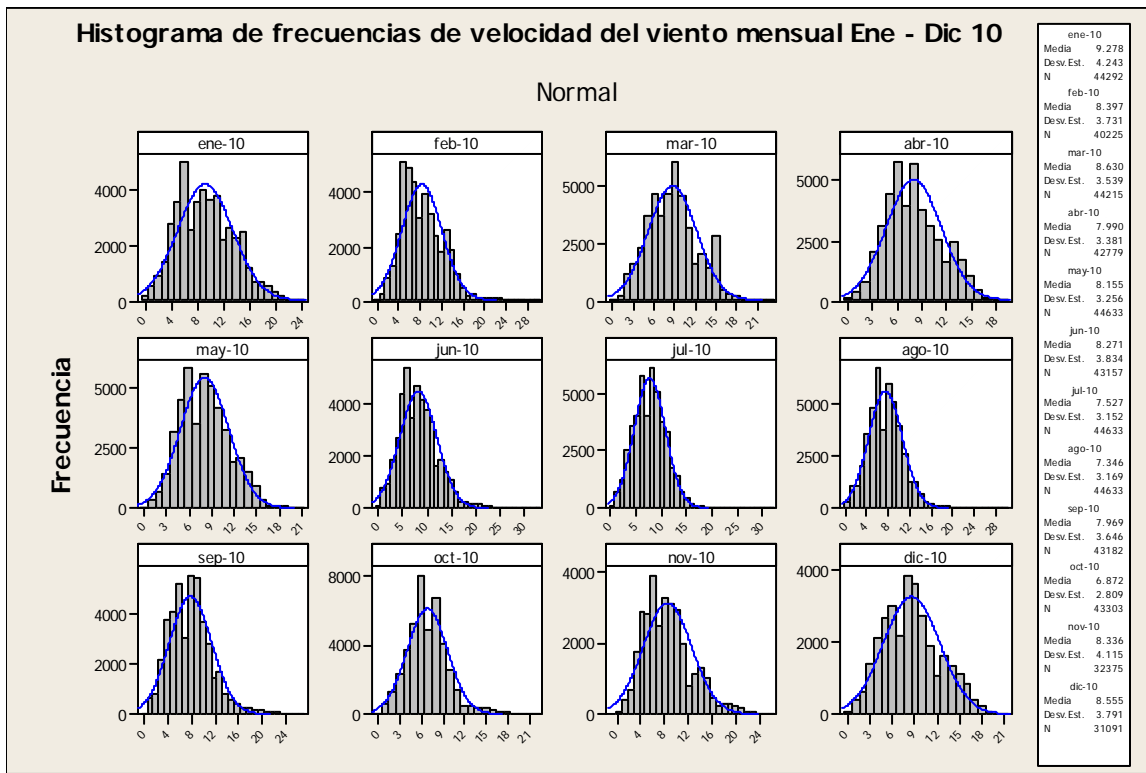
Fuente: Elaboración propia

3.4.5 Datos meteorológicos de 2010

Resumen de datos 2010_mensual			
Fecha	Media	Desviación Estándar	Muestra (N)
ene-10	9.278	4.243	44292
feb-10	8.397	3.731	40225
mar-10	8.630	3.539	44215
abr-10	7.990	3.381	42779
may-10	8.155	3.256	44633
jun-10	8.271	3.834	43157
jul-10	7.527	3.152	44633
ago-10	7.346	3.169	44633
sep-10	7.969	3.646	43182
oct-10	6.872	2.809	43303
nov-10	8.336	4.115	32375
dic-10	8.555	3.791	31091

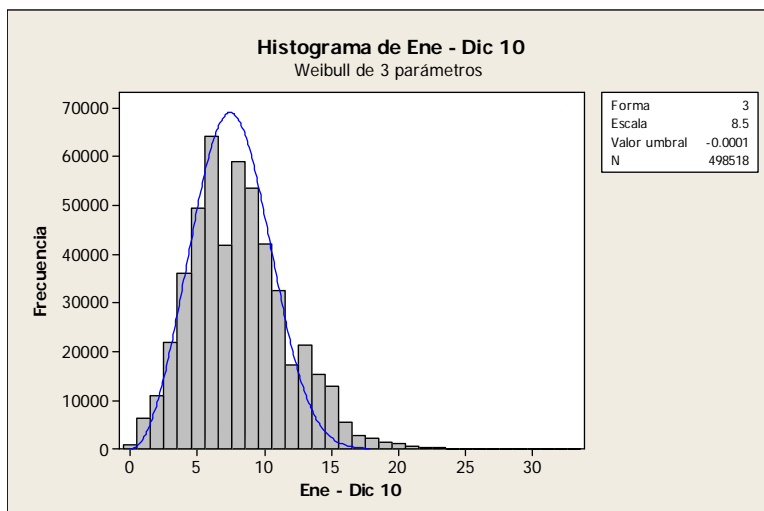


Histograma de frecuencia de velocidad del viento mensual para 2010



Histograma de frecuencias de velocidad del viento mensual para 2010

Fuente: Elaboración propia



Histograma de frecuencia de velocidad del viento anual para 2010

Distribución de frecuencias para 2010				
Intervalo (m/s)	Frec (min)	Frec (Hrs)	%	
0	0.5	782	13.0	0.2
0.5	1.5	6182	103.0	1.2
1.5	2.5	10819	180.3	2.2
2.5	3.5	21702	361.7	4.4
3.5	4.5	36004	600.1	7.2
4.5	5.5	49229	820.5	9.9
5.5	6.5	64143	1069.1	12.9
6.5	7.5	41833	697.2	8.4
7.5	8.5	58843	980.7	11.8
8.5	9.5	53483	891.4	10.7
9.5	10.5	42026	700.4	8.4
10.5	11.5	32420	540.3	6.5
11.5	12.5	17295	288.3	3.5
12.5	13.5	21216	353.6	4.3
13.5	14.5	15291	254.9	3.1
14.5	15.5	12925	215.4	2.6
15.5	16.5	5574	92.9	1.1
16.5	17.5	2597	43.3	0.5
17.5	18.5	2304	38.4	0.5
18.5	19.5	1494	24.9	0.3
19.5	20.5	962	16.0	0.2
20.5	21.5	659	11.0	0.1
21.5	22.5	240	4.0	0.0
22.5	23.5	276	4.6	0.1
23.5	24.5	126	2.1	0.0
24.5	25.5	38	0.6	0.0
25.5	26.5	32	0.5	0.0
26.5	27.5	7	0.1	0.0
27.5	28.5	3	0.1	0.0
28.5	29.5	4	0.1	0.0
29.5	30.5	6	0.1	0.0
<b>Total =</b>	<b>498515</b>	<b>8308.6</b>		

Datos meteorológicos Ene - Dic 2010				
Fecha	Temp aire (°C)	Hum relat (%)	P atm (mBar)	Vel Viento (m/s)
ene-10	20.51	80.15	1015.50	9.28
feb-10	20.64	80.99	1012.97	8.40
mar-10	22.44	75.75	1012.21	8.63
abr-10	25.46	80.88	1009.74	7.99
may-10	26.93	80.61	1009.37	8.16
jun-10	27.51	81.97	1009.42	8.27
jul-10	27.41	80.41	1010.44	7.53
ago-10	27.53	80.16	1010.16	7.35
sep-10	27.65	73.16	1007.99	7.97
oct-10	26.57	63.84	1014.17	6.87
nov-10	24.68	72.43	1014.40	8.34
dic-10	22.19	73.05	1014.54	8.56

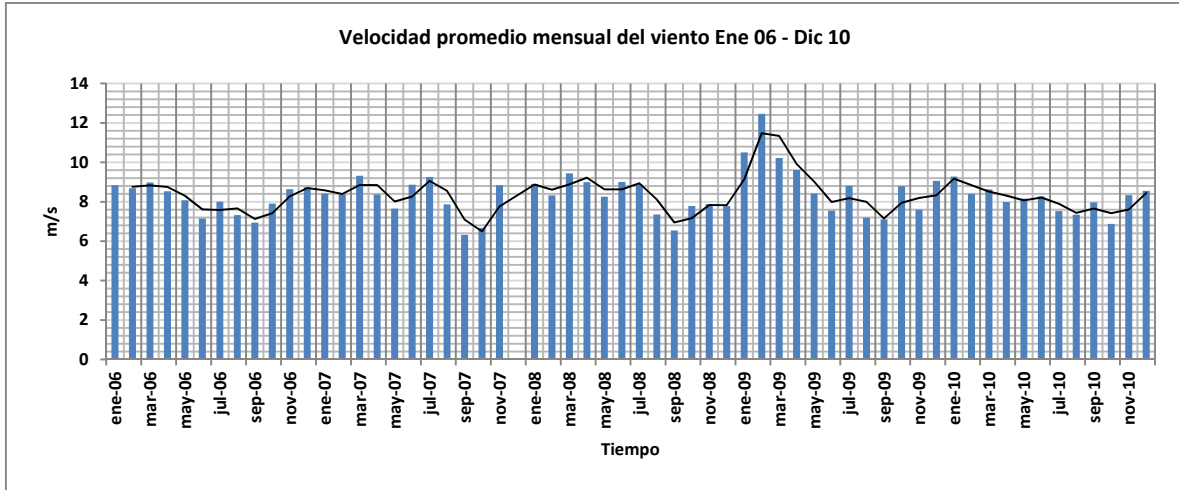
Fuente: Elaboración propia

### 3.5 Caracterización de los vientos

De acuerdo a los resultados del procesado estadístico se obtienen los promedios mensuales de la velocidad del viento y se determina en base a esto la calidad del potencial eólico de la zona para concluir si es o no atractivo para la generación de energía.

#### 3.5.1 Velocidad promedio del viento

Del procesado estadístico de los datos meteorológicos se obtiene la gráfica de velocidad promedio mensual del 2006 al 2010, la cual se muestra a continuación.



Grafica 3.3 Valores promedio mensuales para la velocidad del viento del 1 de ene, 2005 al 31 dic, 2010.

Fuente: Elaboración propia con datos estadísticos del viento procesados en Capitulo III

Al analizar los datos de la gráfica 3.3 se observa que la velocidad promedio del viento a lo largo de cinco años tiene un valor de 8.33 m/s lo cual, de acuerdo a la clasificación de la tabla 3.5, el valor medio para la velocidad del viento es un valor catalogado como clase 5 - 6, excelente para le explotación del potencial eólico. También podemos ver que de acuerdo a la gráfica se observa una variación estacional, donde los meses de septiembre disminuyen la velocidad del viento.

El mapa siguiente ilustra como la Sonda de Campeche y el Litoral de Tabasco se encuentra en un área catalogada con buen potencial eólico.

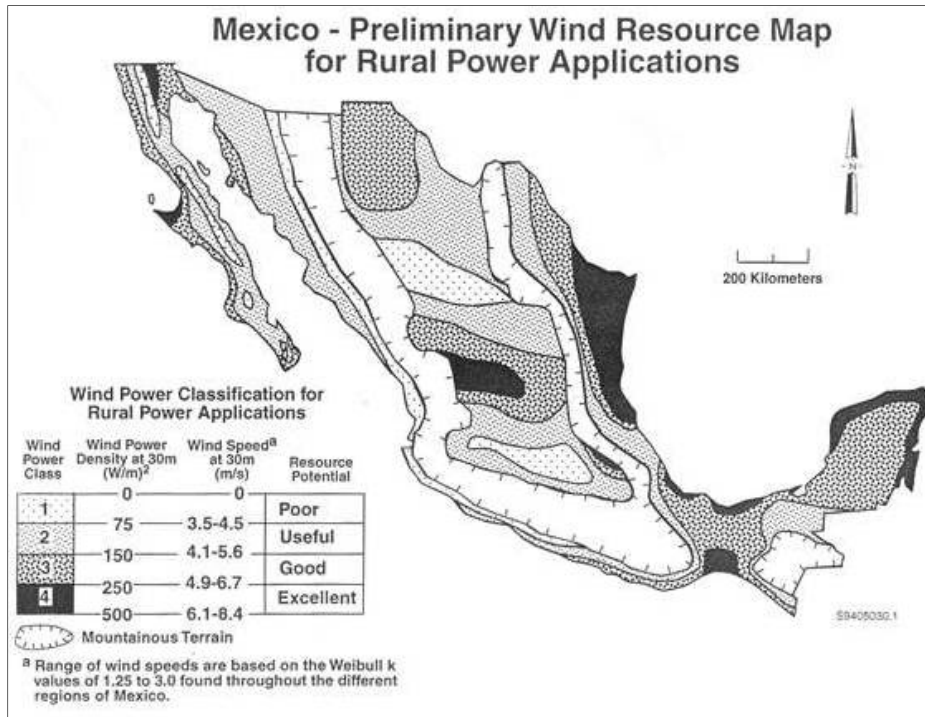
Wind Power Classification				
Wind Power Class	Resource Potential	Wind Power Density at 50 m W/m <sup>2</sup>	Wind Speed <sup>a</sup> at 50 m m/s	Wind Speed <sup>a</sup> at 50 m mph
2	Marginal	200 - 300	5.6 - 6.4	12.5 - 14.3
3	Fair	300 - 400	6.4 - 7.0	14.3 - 15.7
4	Good	400 - 500	7.0 - 7.5	15.7 - 16.8
5	Excellent	500 - 600	7.5 - 8.0	16.8 - 17.9
6	Outstanding	600 - 800	8.0 - 8.8	17.9 - 19.7
7	Superb	800 - 1600	8.8 - 11.1	19.7 - 24.8

<sup>a</sup> Wind speeds are based on a Weibull k value of 2.0

Tabla 3.5. Clasificación del potencial eólico

Fuente: D. Elliott, M. Schwartz. Wind Resource Assessment. NREL Golden, Colorado. Ago 2006





Mapa Eólico general de la República Mexicana

Fuente: Marc N. Schwartz, Dennis L. Elliott. México Wind Resource Assessment Project. Windpower '95, Washington, D. C. Marzo 1995

### 3.5.2 Clasificación de los vientos de acuerdo al IEC - 61400

Para la selección de las turbinas es importante saber la clasificación y la turbulencia de los vientos. La INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC) define el INTERNATIONAL STANDARD 61400-1 del 2005 las especificaciones de diseño en cuanto a velocidad promedio anual del viento y la turbulencia del mismo, la tabla 3.6 muestra estos parámetros.

IEC Wind Turbine Classes									
Wind Speed Parameters for Wind Turbine Classes									
	I		II		III		IV		
Reference Wind Speed, $U_{ref}$ (m/s)	50		42.5		37.5		30		
Annual Average Wind Speed $U_{ave}$ (m/s)	10		8.5		7.5		6		
50-year Return Gust Speed, $1.4 U_{ref}$ (m/s)	70		59.5		52.5		42		
1-year Return Gust Speed, $1.05 U_{ref}$ (m/s)	52.5		44.6		39.4		31.5		
Notes: 10-minute averages, hub height wind speed. Air density: 1.225 kg/m <sup>3</sup> .									
Turbulence Intensity Classes									
	I		II		III		IV		
	A	B	A	B	A	B	A	B	
$I_{15}$ (Turbulence Intensity at 15 m/s)	18%	16%	18%	16%	18%	16%	18%	16%	
a	2	3	2	3	2	3	2	3	
$I_u$ (Turbulence Intensity)	0.210	0.180	0.226	0.191	0.240	0.200	0.270	0.220	
$I_u$ (Turbulence Intensity) = $I_{15}(a=15/U_{ave})/(a+1)$									
Source: IEC 61400-1; cited in Wind Energy Handbook, Tony Burton, et al, John Wiley & Sons UK, 2001, ISBN: 0-471-48997-2, p. 210.									
Caution: Verify with current IEC 61400-1 for all parameters and criteria.									

Tabla 3.6 Clasificación de los vientos de acuerdo al IEC. Fuente: IEC-International Standards 61400 – 1

Con lo anterior y como la velocidad del viento promedio es de 8.33 m/s se puede catalogar a los vientos como clase II – III, el factor de turbulencia a 15 m se calcula de acuerdo al procedimiento descrito por Burton<sup>(24)</sup> y básicamente es dividiendo la desviación estándar entre la velocidad media anual a 15 m<sup>(25)</sup>. La tabla 3.7 muestra los datos calculados:

Año	Velocidad media anual a 80 m (m/s)	Velocidad media anual a 15 m (m/s)	Desviación Estándar	Intensidad de Turbulencia @ 15 m (%)	a	lu	Vientos max (m/s)	Max (km/hr)
2006	8.16	6.46	0.8587	10.52	3.0205	0.1878	28.42	102.312
2007	8.20	6.49	0.8630	10.52	3.0051	0.1876	27.37	98.532
2008	8.32	6.58	0.8751	10.52	2.9628	0.1869	27.72	99.792
2009	8.90	7.04	0.9346	10.50	2.7699	0.1837	31.99	115.164
2010	8.09	6.40	0.8517	10.52	3.0459	0.1882	32.66	117.576
<b>Promedio</b>	<b>8.34</b>	<b>6.59</b>	<b>0.8766</b>	<b>10.52</b>	<b>2.9608</b>	<b>0.1868</b>	<b>Max</b>	<b>118</b>

Tabla 3.7 Calculo de intensidad de turbulencia y máximos históricos del viento. Fuente: Elaboración propia

Se observa que la intensidad de turbulencia es de 10% por lo que se puede optar por la clasificación B, quedando una clasificación de los vientos IEC IIB como mínimo.

Otro factor que se debe considerar es el máximo de vientos durante los huracanes o tormentas tropicales que son comunes en el Golfo de México, de acuerdo a los daos analizados del 2005 al 2010 se ha tenido un máximo de vientos de 118 km/hr pero es necesario ver los registros históricos de los fenómenos meteorológicos que se han tenido en la zona.

La tabla 3.8 muestra la clasificación de los huracanes de acuerdo a la escala Saffir-Simpson y la tabla 3.9 muestra el histórico de fenómenos meteorológicos para el área de estudio, los cuales se deben tomar en cuenta cuando se eligen las turbinas eólicas.

Categoría	Vientos (km/hr)	Vientos (m/s)
1	119-153	33 - 42
2	154-177	43 - 49
3	178-209	50 - 58
4	210-249	59 - 69
5	> 249	> 70

Tabla 3.8 Clasificación de los huracanes de acuerdo a la escala Saffir-Simpson  
Fuente: National Hurricane Center, USA.

AÑO	NOMBRE	Categoría en Impacto	LUGAR DE ENTRADA A TIERRA Ó COSTA MAS CERCANA	ESTADOS AFECTADOS	PERIODO (inicio-fin)	Vientos Max (en impacto) (Km/hr)	Vientos Max (en impacto) (m/s)
2007	DEAN	H5[H2]	Puerto Bravo, Q Roo [Tecolutla, Ver]	Q Roo, Camp, Ver, Pue, Hgo, Qro	13-23 Ago	260 [155]	72 (43)
2005	EMILY	H4 [H3]	20 km al N de Tulum, QR [El Mezquite, Tamp]	QROO, YUC, TAMP, NL	10-21 Jul	215 [205]	60 (57)
1995	ROXANNE	H3 (DT)	TULUM,QROO (MTZ DE LA TORRE, VER)	QROO,YUC,CAMP, TAB,VER	8-20 OCT	185 (45)	51 (13)
1990	DIANA	TT (H2)	CHETUMAL, QROO (TUXPAN, VER)	QRoo, YUC, CAM,VER,HGO, SLP, QRO, GTO, JAL, NAY	4-8 AGO	110 (158)	31 (44)
1980	HERMINE	TT (TT)	SACXAN, QROO (CATEMACO, VER)	QROO,CAMP,VER,OAX	20-26 SEP	100 (110)	28 (31)
1971	EDITH	TT(TT)	CHETUMAL, QROO (LA PESCA, TAMP)	QROO, CAMP, TAMP	5-18 SEP	110 (85)	31 (24)

Tabla 3.9 Histórico de Huracanes en el área del Proyecto.

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua

De acuerdo a lo anterior se puede elegir la tecnología aplicable al caso en estudio, para efectuar un análisis más confiable se evaluarán tres escenarios con turbinas de diferente capacidad a fin de tener una idea de cuál es la mejor opción, esto se ilustra en el siguiente capítulo.

<sup>24</sup> Burton Tony. Wind Energy Handbook, 3er Reimpresión, Inglaterra. John Wiley and Sons Ltd. 2001

<sup>25</sup> Villarrubia Miguel, Energía Eólica. Barcelona España. Ediciones CEAC, 2004

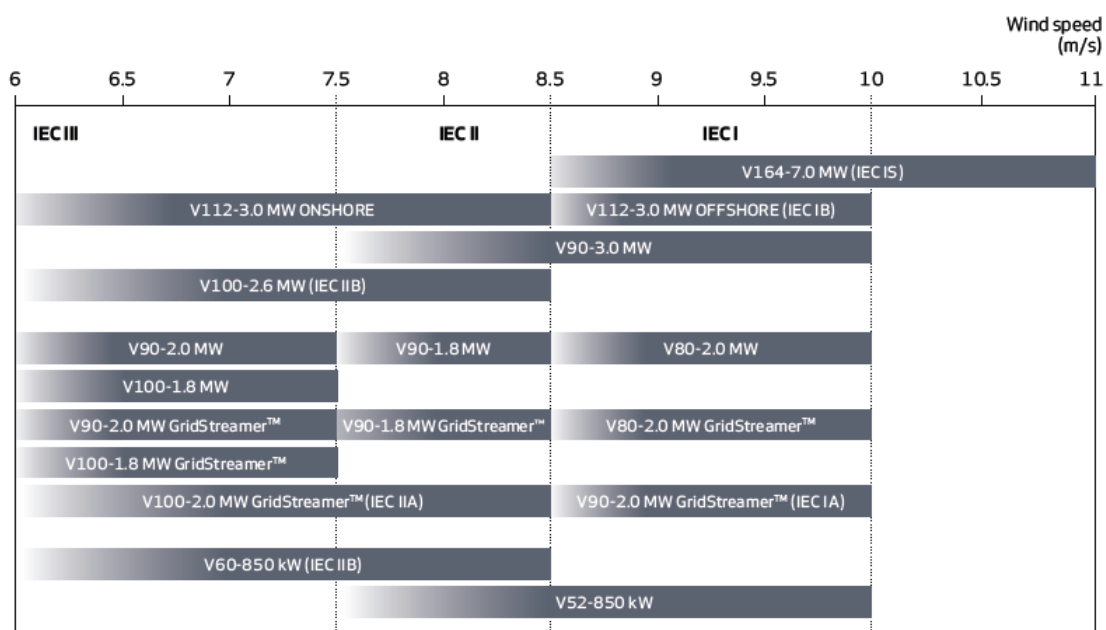
## Capítulo IV. Cálculo de energía y análisis financiero

Una vez que se ha determinado la localización del proyecto, el potencial eólico de la zona y clasificado los vientos en base a su capacidad para generar energía, se selecciona la tecnología y se calcula la curva de energía en base a los datos proporcionados por el fabricante. Es importante mencionar que se utilizara el método visto en el punto 2.5.2.

### 4.1 Selección de las turbinas

Para la selección de las turbinas eólicas para el proyecto se efectúa una búsqueda de las turbinas actuales disponibles en el mercado y mediante las características que proporciona el fabricante se elige la más adecuada en cuanto a la capacidad de generación, la localización propuesta y las condiciones de viento predominantes en la zona.

Del fabricante Vestas se obtuvo una gráfica donde indica, de acuerdo a la velocidad del viento, la turbina recomendada para el régimen de vientos que se tiene en la zona.



Overview of Vestas wind turbines operating in the various wind classes.

Tabla de selección de turbinas del fabricante Vestas de acuerdo a la clasificación de los vientos

Fuente: Our complete product portfolio, Vestas 2011

De acuerdo a la clasificación de los vientos vistos en el capítulo anterior se selecciona las siguientes turbinas:

MODELO DE TURBINA	POTENCIA	FABRICANTE	CLASE DE VIENTOS
GEV HP-1.0 MW	1 MW	VERGNET	IEC II
V100-2.0 MW GridStreamer™	2 MW	VESTAS	IEC IIA
V112-3.0 MW OFFSHORE	3 MW	VESTAS	IEC IB

#### 4.1.1 Características técnicas de las turbinas

Para efectos de comparar diferentes turbinas se eligen las de 1, 2 y 3 MW de potencia, a continuación se dan las características técnicas de las turbinas seleccionadas.

Características	GEV HP-1.0 MW	V100-2.0 MW GridStreamer™	V112-3.0 MW OFFSHORE
<b>Fabricante</b>	VERGNET	VESTAS	VESTAS
<b>Datos de operación</b>			
Potencia nominal (KW)	1000	2000	3000
Velocidad de conexión (m/s)	3	4	3
Velocidad nominal (m/s)	15	12.5	12.5
Velocidad de corte (m/s)	25	20	25
Clase de Viento IEC	II	IIA	IB
Vientos máximos (m/s)	86		
<b>Rango de temperatura de operación (°C)</b>	- 10 a 50	- 20 a 40	-20 a 35
<b>Rotor</b>			
Diámetro (m)	58	100	112
Área barrida (m2)	2642	7854	9852
Revoluciones nominales (rpm)		14.9	13.8
Intervalo de operación (rpm)	13 - 24	8.8 - 14.9	8.1 - 19
<b>Sistema eléctrico</b>			
Frecuencia (Hz)	50 - 60	50 - 60	50
Tipo de generador	Asynchronous squirrel cage Rotor: Variable speed through PLC	Generador de imán permanente	Generador de imán permanente
Convertidor	IGBT Full Scale Drive	Convertidor de escala total	Convertidor de escala total
<b>Tipo Caja de cambios</b>	Epíciclico de 3 etapas y marcha paralela	Uno planetario y dos etapas helicoidales	Planetario - Elíptico de 4 etapas
<b>Torre</b>			
Tipo	Tubular enrejado	Torre de acero tubular	Torre de acero tubular
Altura del buje	70	90	Específico del sitio
<b>Dimensiones de las palas</b>			
Longitud		49	56.65
Ancho máximo		3.9	4

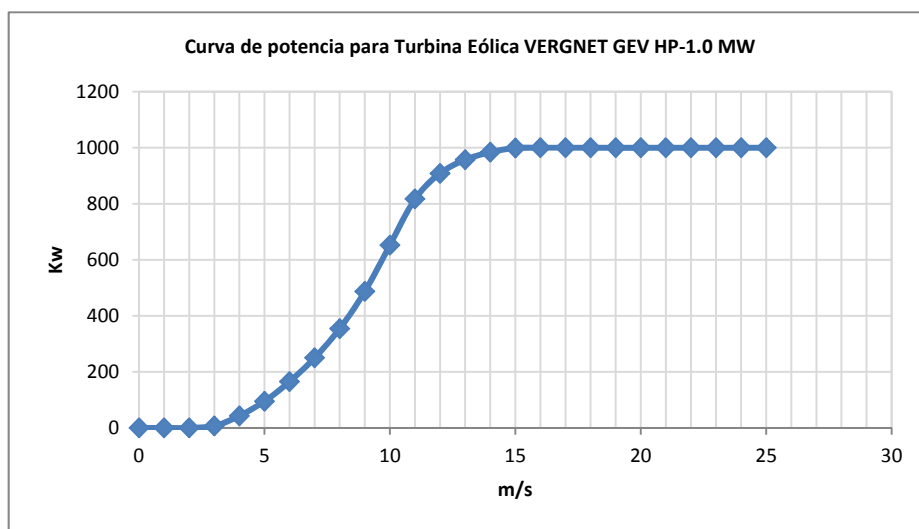
#### 4.1.2 Curva de potencia de las turbinas eólicas

Como se mencionó en el capítulo 2 las curvas de potencia de una turbina eólica nos sirven para calcular la energía que puede generar la turbina en base a la distribución de velocidades del viento de la zona de estudio, estas curvas son información que proporciona el fabricante.

A continuación se muestran dichas gráficas para cada de las turbinas eólicas seleccionadas.

##### VERGNET: GEV HP (1 MW)

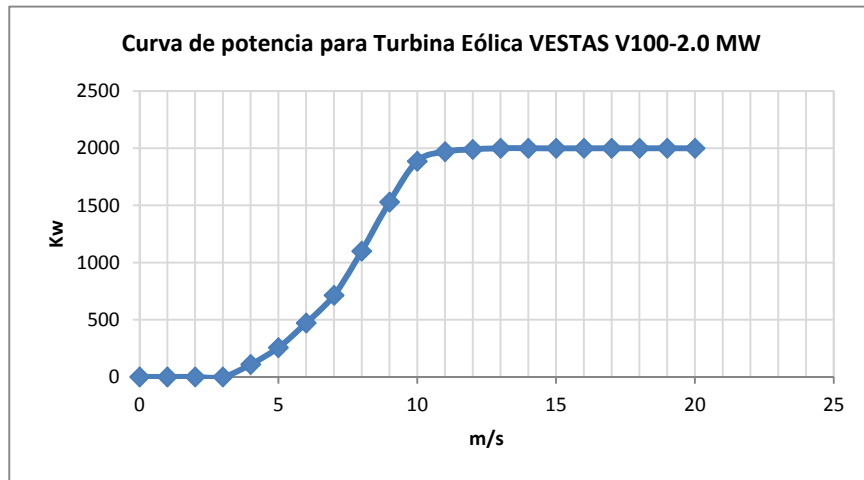
Tabla de datos para curva de potencia turbina VERGNET GEV HP 1 MW	
V (m/s)	P (Kw)
0	0
1	0
2	0
3	7
4	43
5	95
6	165
7	250
8	354
9	487
10	652
11	817
12	908
13	957
14	984
15	999
16	1000
17	1000
18	1000
19	1000
20	1000
21	1000
22	1000
23	1000
24	1000
25	1000
26	0



Fuente: Elaboración propia con datos del fabricante obtenidas de la pagina: [www.vergnet.fr](http://www.vergnet.fr), 2011

**VESTAS: V100-2.0 MW GridStreamer™**

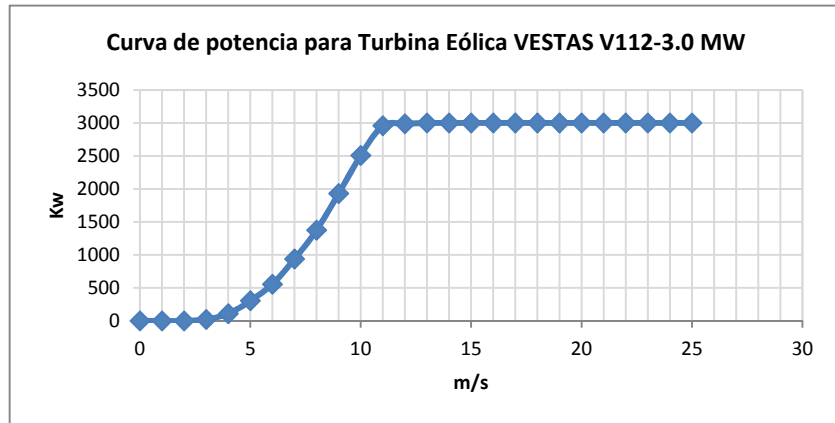
Tabla de datos para curva de potencia turbina VESTAS V100-2.0 MW	
V (m/s)	P (Kw)
0	0
1	0
2	0
3	0
4	109
5	257
6	472
7	714
8	1100
9	1529
10	1886
11	1970
12	1990
13	2000
14	2000
15	2000
16	2000
17	2000
18	2000
19	2000
20	2000
21	0



Fuente: Elaboración propia con datos del fabricante obtenidas de la pagina <http://www.vestas.com/en/>

**VESTAS V112-3.0 MW OFFSHORE**

Tabla de datos para curva de potencia turbina VESTAS V112-3.0 MW OFFSHORE	
V (m/s)	P (Kw)
1	0
2	0
3	22
4	109
5	306
6	556
7	938
8	1375
9	1931
10	2509
11	2959
12	2989
13	3000
14	3000
15	3000
16	3000
17	3000
18	3000
19	3000
20	3000
21	3000
22	3000
23	3000
24	3000
25	3000
26	0



Fuente: Elaboración propia con datos del fabricante obtenidas de la pagina: <http://www.vestas.com/en/>, 2011

## 4.2 Cálculo de la energía generada

### 4.2.1 Cálculo de energía para turbina VERGNET GEV HP – 1.0 MW

De acuerdo a la distribución de frecuencias de la velocidad del viento obtenidas en el capítulo 3 para cada año y usando la curva de potencia de la turbina VERGNET GEV HP 1 MW se obtiene la cantidad de energía generada en el periodo de tiempo en estudio.

A continuación se muestra el resumen del cálculo de energía para cada año.

Curva de potencia Turbina 1 MW			Estimación de producción de energía Turbina VERGNET GEV HP-1.0 MW									
Intervalo (m/s)	Potencia (Kw)		2006		2007		2008		2009		2010	
			Hrs	Kwh	Hrs	Kwh	Hrs	Kwh	Hrs	Kwh	Hrs	Kwh
0.0	0.5	0	14	0	17	0	0	0	5	0	13	0
0.5	1.5	0	100	0	107	0	69	0	71	0	103	0
1.5	2.5	0	225	0	324	0	311	0	133	0	180	0
2.5	3.5	7	381	2667	411	2874	323	2264	284	1986	362	2532
3.5	4.5	43	575	24740	542	23327	497	21371	486	20883	600	25803
4.5	5.5	95	820	77916	615	58442	643	61129	629	59746	820	77946
5.5	6.5	165	738	121712	785	129462	798	131599	900	148525	1069	176393
6.5	7.5	250	1021	255371	822	205417	784	195942	602	150517	697	174304
7.5	8.5	354	1018	360466	924	327002	1057	374208	957	338754	981	347174
8.5	9.5	487	808	393342	782	380940	767	373635	962	468486	891	434104
9.5	10.5	652	762	497074	810	527914	731	476351	736	479883	700	456683
10.5	11.5	817	557	455205	643	525549	635	518591	605	494625	540	441452
11.5	12.5	908	489	444345	559	507133	513	465350	379	343981	288	261731
12.5	13.5	957	339	324646	355	339655	378	361475	376	360199	354	338395
13.5	14.5	984	283	278324	260	255381	251	246951	331	325671	255	250772
14.5	15.5	999	184	183666	149	148718	197	196520	234	234166	215	215201
15.5	16.5	1000	108	108350	100	99667	72	71950	190	190483	93	92900
16.5	17.5	1000	58	58167	47	46667	46	46017	123	122850	43	43283
17.5	18.5	1000	30	29750	26	26367	27	26567	76	75833	38	38400
18.5	19.5	1000	9	9233	14	14300	17	17050	64	63733	25	24900
19.5	20.5	1000	7	6917	10	10033	11	10983	35	35033	16	16033
20.5	21.5	1000	4	4000	5	5250	9	8733	21	20717	11	10983
21.5	22.5	1000	2	2267	4	4217	5	4500	9	9450	4	4000
22.5	23.5	1000	2	2367	3	3317	4	3900	8	7650	5	4600
23.5	24.5	1000	2	1917	3	2967	3	3250	3	2750	2	2100
24.5	25.5	1000	1	1117	2	1817	2	2183	1	750	1	633
25.5	26.5	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0
<b>Total</b>			<b>8540</b>	<b>3643559</b>	<b>8318</b>	<b>3646412</b>	<b>8150</b>	<b>3620518</b>	<b>8220</b>	<b>3956671</b>	<b>8308</b>	<b>3440324</b>
Factor de planta			0.4266		0.4384		0.4442		0.4814		0.4141	

Fuente: Elaboración propia

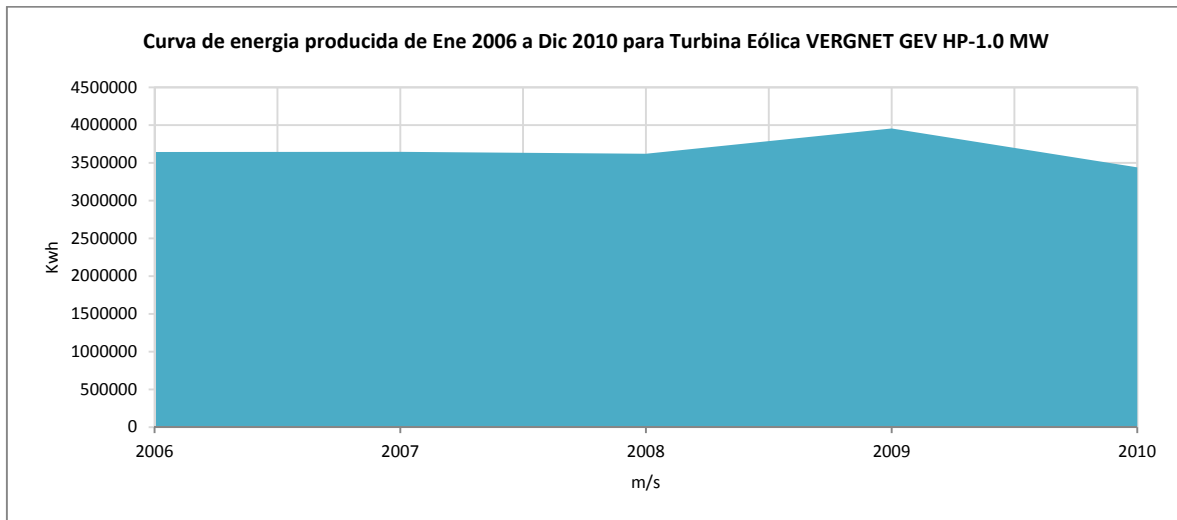
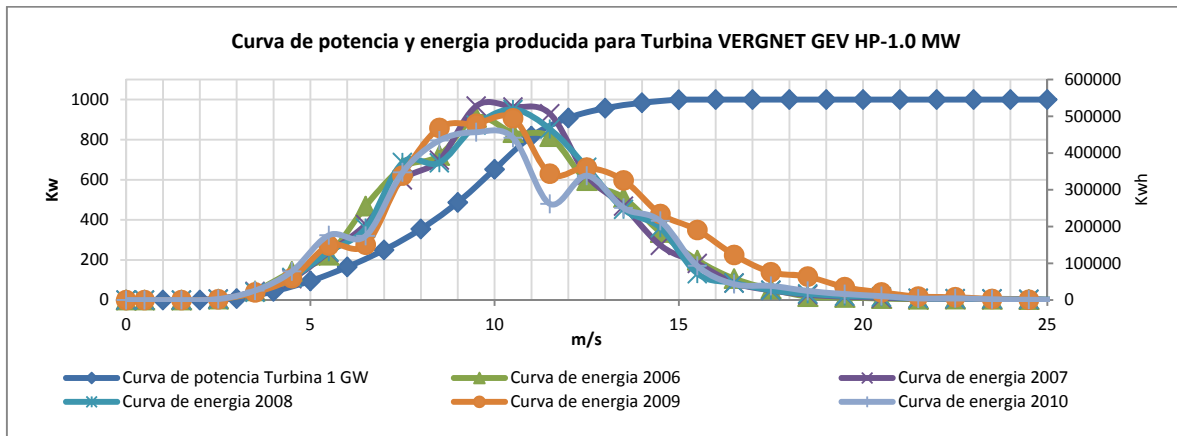


La tabla anterior arroja la energía total generada en Kwh en el intervalo dado por el numero de horas totales de la muestra. Cuando se efectue la evaluación economica del proyecto se utilizara el valor promedio de energía en un año, obtenido al eliminar los valores maximo y el minimo y promediar los restantes.

La siguiente tabla es el resumen de la producción de energía para todos los años del 2006 al 2010.

Resumen de producción de energía Turbina VERGNET GEV HP-1.0 MW		
Año	Hrs	Energía (KWh)
2006	8540	3643559
2007	8318	3646412
2008	8150	3620518
2009	8220	3956671
2010	8308	3440324
<b>Promedio</b>	<b>8307.2</b>	<b>3661497</b>

La grafica muestra la curva de potencia en Kw con respecto a la velocidad del viento en m/s, también se muestra las gráficas de producción de energía para cada año del 2005 al 2010 toda la información es calculada para la turbina VESTAS GEV HP – 1.0 MW.



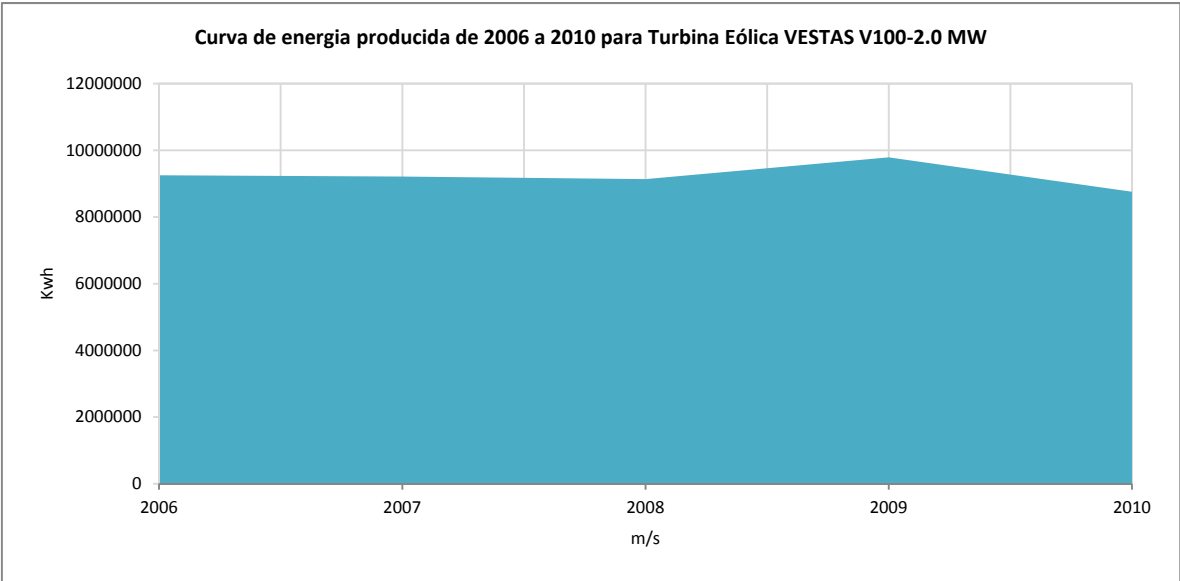
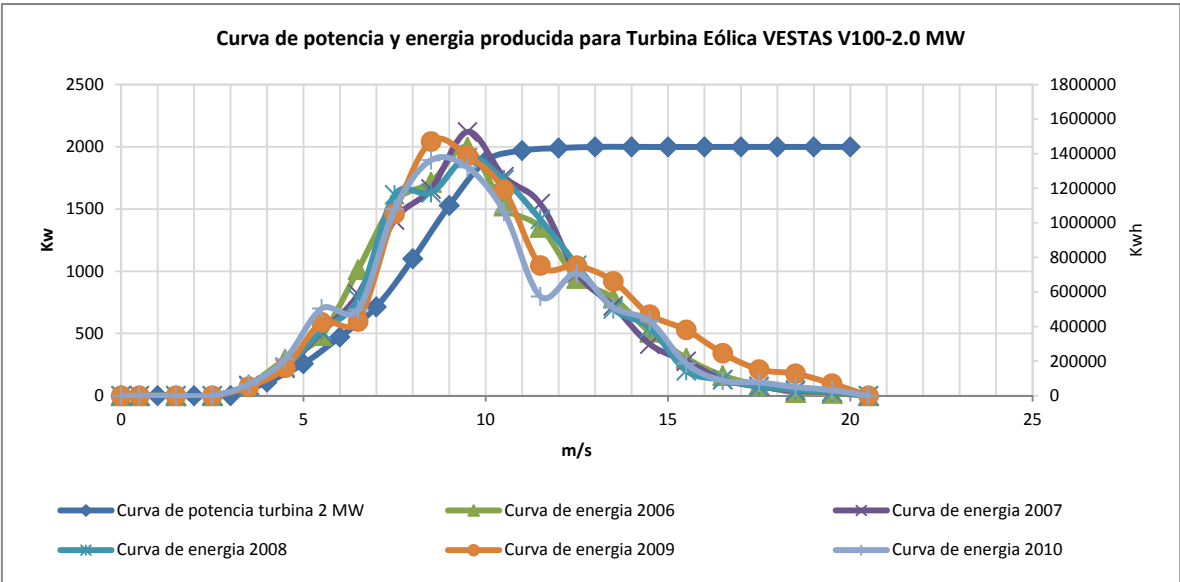
Fuente: Elaboración propia

## 4.2.2 Cálculo de energía para turbina VESTAS: V100-2.0 MW GridStreamer™

Curva de potencia Turbina 2 MW			Estimación de producción de energía Turbina VESTAS V100-2.0 MW									
Intervalo (m/s)		Potencia (Kw)	2006		2007		2008		2009		2010	
			Hrs	Kwh	Hrs	Kwh	Hrs	Kwh	Hrs	Kwh	Hrs	Kwh
0.0	0.5	0	14	0	17	0	0	0	5	0	13	0
0.5	1.5	0	100	0	107	0	69	0	71	0	103	0
1.5	2.5	0	225	0	324	0	311	0	133	0	180	0
2.5	3.5	0	381	0	411	0	323	0	284	0	362	0
3.5	4.5	109	575	62713	542	59131	497	54173	486	52936	600	65407
4.5	5.5	257	820	210783	615	158102	643	165371	629	161627	820	210864
5.5	6.5	472	738	348171	785	370339	798	376451	900	424871	1069	504592
6.5	7.5	714	1021	729339	822	586670	784	559609	602	429876	697	497813
7.5	8.5	1100	1018	1120093	924	1016107	1057	1162792	957	1052627	981	1078788
8.5	9.5	1529	808	1234948	782	1196009	767	1173074	962	1470873	891	1362925
9.5	10.5	1886	762	1437855	810	1527063	731	1377912	736	1388127	700	1321017
10.5	11.5	1970	557	1097618	643	1267235	635	1250458	605	1192671	540	1064457
11.5	12.5	1990	489	973840	559	1111448	513	1019875	379	753878	288	573618
12.5	13.5	2000	339	678467	355	709833	378	755433	376	752767	354	707200
13.5	14.5	2000	283	565700	260	519067	251	501933	331	661933	255	509700
14.5	15.5	2000	184	367700	149	297733	197	393433	234	468800	215	430833
15.5	16.5	2000	108	216700	100	199333	72	143900	190	380967	93	185800
16.5	17.5	2000	58	116333	47	93333	46	92033	123	245700	43	86567
17.5	18.5	2000	30	59500	26	52733	27	53133	76	151667	38	76800
18.5	19.5	2000	9	18467	14	28600	17	34100	64	127467	25	49800
19.5	20.5	2000	7	13833	10	20067	11	21967	35	70067	16	32067
20.5	21.5	0	4	0	5	0	9	0	21	0	11	0
<b>Total</b>			<b>8532</b>	<b>9252060</b>	<b>8305</b>	<b>9212804</b>	<b>8135</b>	<b>9135648</b>	<b>8199</b>	<b>9786852</b>	<b>8296</b>	<b>8758247</b>
Factor de planta			0.5422		0.5547		0.5615		0.5968		0.5278	

Resumen de producción de energía Turbina VESTAS V100-2.0 MW		
Año	Hrs	Energía (KWh)
2006	8532	9252060
2007	8305	9212804
2008	8135	9135648
2009	8199	9786852
2010	8296	8758247
<b>Promedio</b>	<b>8293.4</b>	<b>9229122</b>

Fuente: Elaboración propia



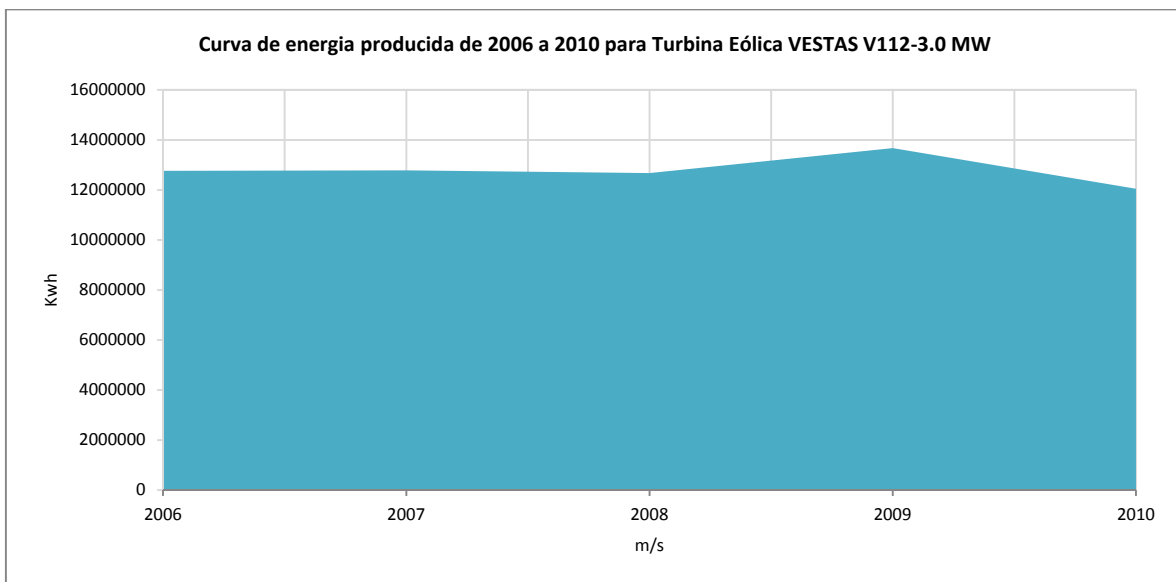
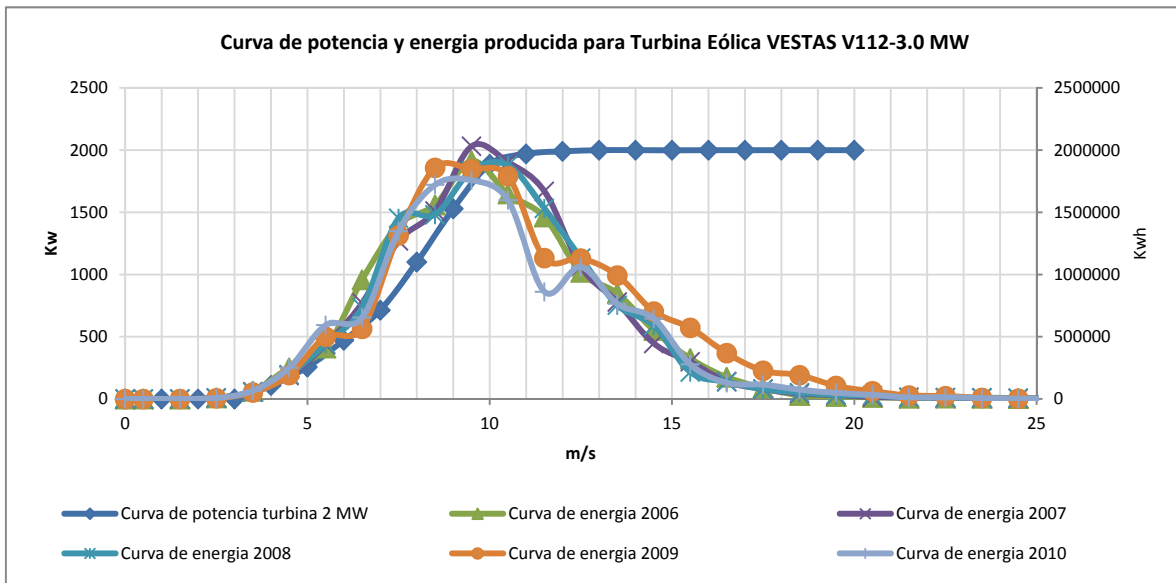
Fuente: Elaboración propia

## 4.2.3 Cálculo de energía para turbina VESTAS V112-3.0 MW OFFSHORE

Curva de potencia Turbina 3 MW			Estimación de producción de energía Turbina VESTAS V112-3.0 MW									
Intervalo (m/s)		Potencia (Kw)	2006		2007		2008		2009		2010	
			Hrs	Kwh	Hrs	Kwh	Hrs	Kwh	Hrs	Kwh	Hrs	Kwh
0.0	0.5	0	14	0	17	0	0	0	5	0	13	0
0.5	1.5	0	100	0	107	0	69	0	71	0	103	0
1.5	2.5	0	225	0	324	0	311	0	133	0	180	0
2.5	3.5	22	381	8383	411	9032	323	7117	284	6241	362	7957
3.5	4.5	109	575	62713	542	59131	497	54173	486	52936	600	65407
4.5	5.5	306	820	250971	615	188246	643	196901	629	192443	820	251068
5.5	6.5	556	738	410133	785	436247	798	443447	900	500483	1069	594392
6.5	7.5	938	1021	958151	822	770723	784	735173	602	564739	697	653989
7.5	8.5	1375	1018	1400117	924	1270133	1057	1453490	957	1315783	981	1348485
8.5	9.5	1931	808	1559637	782	1510460	767	1481495	962	1857590	891	1721261
9.5	10.5	2509	762	1912820	810	2031495	731	1833075	736	1846666	700	1757387
10.5	11.5	2959	557	1648656	643	1903426	635	1878225	605	1791428	540	1598846
11.5	12.5	2989	489	1462717	559	1669406	513	1531863	379	1132333	288	861579
12.5	13.5	3000	339	1017700	355	1064750	378	1133150	376	1129150	354	1060800
13.5	14.5	3000	283	848550	260	778600	251	752900	331	992900	255	764550
14.5	15.5	3000	184	551550	149	446600	197	590150	234	703200	215	646250
15.5	16.5	3000	108	325050	100	299000	72	215850	190	571450	93	278700
16.5	17.5	3000	58	174500	47	140000	46	138050	123	368550	43	129850
17.5	18.5	3000	30	89250	26	79100	27	79700	76	227500	38	115200
18.5	19.5	3000	9	27700	14	42900	17	51150	64	191200	25	74700
19.5	20.5	3000	7	20750	10	30100	11	32950	35	105100	16	48100
20.5	21.5	3000	4	12000	5	15750	9	26200	21	62150	11	32950
21.5	22.5	3000	2	6800	4	12650	5	13500	9	28350	4	12000
22.5	23.5	3000	2	7100	3	9950	4	11700	8	22950	5	13800
23.5	24.5	3000	2	5750	3	8900	3	9750	3	8250	2	6300
24.5	25.5	3000	1	3350	2	5450	2	6550	1	2250	1	1900
25.5	26.5	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0
<b>Total</b>			<b>8540</b>	<b>12764348</b>	<b>8318</b>	<b>12782050</b>	<b>8150</b>	<b>12676559</b>	<b>8220</b>	<b>13673642</b>	<b>8308</b>	<b>12045473</b>
Factor de planta			0.4982		0.5122		0.5185		0.5545		0.4833	

Fuente: Elaboración propia

Resumen de producción de energía Turbina VESTAS V112-3.0 MW		
Año	Hrs	Energía (KWh)
2006	8540	12764348
2007	8318	12782050
2008	8150	12676559
2009	8220	13673642
2010	8308	12045473
<b>Promedio</b>	<b>8307.2</b>	<b>12788414</b>



Fuente: Elaboración propia

De los datos de rendimiento del motor Caterpillar mostrados en el punto 3.2 se obtiene que para un generador diesel trabajando al 75% de carga, produce una potencia de 772.5 Kw con un consumo de 201 lts de diesel por hora. Combinando estos datos con el consumo mensual de combustible de 165,000 lts de diesel para generar energía eléctrica en una plataforma petrolera se tiene que la energía promedio generada es de 7609701 Kwh.

La tabla siguiente muestra el promedio anual de energía generado por cada turbina en un año, se considera las pérdidas de energía en el sistema eólico que según la Wind Energy Association son del orden de 15% .

También se muestra el porcentaje que representa en el total de energía utilizada por una plataforma petrolera, datos en base al rendimiento mencionado del generador.

Turbina	Energía promedio anual (Kwh)	Energía promedio anual con pérdidas de 15% (Kwh)	% del total de energía
1 MW	3661497	3112272	41
2MW	9229122	7844754	103
3 MW	12788414	10870152	143

Fuente: Elaboración propia

Estos datos se tomaran para el análisis financiero a detalle que se realiza más adelante.

### 4.3 Análisis financiero

La evaluación económica de proyectos de inversión es el tema más importante a la hora de decidir si se invierte o no en un proyecto, existen muchos métodos de evaluación pero al final lo importante es determinar los indicadores de rentabilidad que nos dirán si el proyecto es viable y atractivo financieramente <sup>(26)</sup>. Los valores de las premisas usadas en la evaluación deben ser cuidadosamente seleccionados a fin de obtener los datos más confiables y decidir sobre una base firme <sup>(27)</sup>.

También es importante que se realice un análisis de sensibilidad variando los valores de las variables que pueden afectar nuestro proyecto, como por ejemplo que se incremente el costo de la inversión, o los costos de operación y mantenimiento, etc. El estudio de estos casos nos dará un escenario de riesgo que nos indicara si el proyecto sigue siendo rentable aun cuando se nos incrementen los costos <sup>(28)</sup>.

Para el análisis financiero de nuestro proyecto se tomara el promedio anual de energía generado por cada turbina durante los cinco años evaluados. Con esto se tendrá un valor fijo de energía generada por año para cada turbina. Lo anterior es para efectos prácticos y simplificar la evaluación, pero proporciona datos confiables en los resultados obtenidos.

Tomando en cuenta la filosofía de operación actual, se puede realizar el análisis, comparando la energía generada por la turbina eólica contra la energía que generaría un motor diesel y efectuado el cálculo financiero a partir del ahorro por el costo en combustible dejado de utilizar.

Este concepto de evaluación de proyectos energéticos lo incluyen algunos autores <sup>(29)</sup> ya que este tipo de ingresos se producirá como una compensación de gastos, desde el punto de vista que la instalación renovable sustituirá o será alternativa a una convencional y se incluye en un análisis del costo total cuya decisión de inversión vendrá definida por la consecución de un VAN mayor o igual que cero.

<sup>26</sup> PEP, Gerencia de Reservas: Premisas 2004-2018 para la Evaluación económica de proyectos de inversión, 2003.

Para la evaluación económica se usará el método de unidades de producción que contempla la amortización de la inversión en proporción a la cantidad de energía producida anual durante el periodo de pago de la inversión<sup>(30)</sup>.

A fin de conocer que turbina eólica es la que más nos conviene, se evaluará cada caso por separado y al final se comparan los indicadores de rentabilidad obtenidos a fin de elegir la más adecuada.

Del mercado externo los costos aproximados de un proyecto eólico costa afuera se muestran en la siguiente tabla.

Resumen de costos de instalación de una turbina eólica		
Concepto	Inversión (€1000/MW)	% del total
Fabricación de Turbina, transporte y montaje	815	47.8
Estación de transformación y cable para distribución	270	15.8
Interconexión a la RED	85	5.0
Construcción de base	350	20.5
Diseño y dirección del proyecto	100	5.9
Análisis del medio ambiente	50	2.9
Financiamiento	15	0.9
Varios	20	1.2
<b>Total</b>	<b>1705</b>	<b>100</b>

Fuente: The Economics of Wind Energy. A report by the European Wind Energy Association, 2009

Los costos mostrados son en miles de Euros por MW instalado y representan un promedio de varios casos en diferentes países donde se han instalado centrales eólicas costa afuera.

Para la evaluación de nuestro proyecto y a efectos de hacerla más confiable se tomará un valor de 2130 (1000 euros/MW), es decir, un 25% adicional, lo cual nos servirá para una evaluación preliminar para la toma de decisiones, pero en un caso dado de que se decida invertir en el proyecto se debe efectuar el cálculo de costos a detalle y realizar la evaluación económica con los costos reales.

Para las tres turbinas se usarán las siguientes premisas, las cuales se utilizan comúnmente en proyectos de esta naturaleza.

Premisas generales para la evaluación		
Tasa de interés %		14
Tasa de descuento %		10
Periodo de vida del proyecto (años)	Construcción	1
	Vida productiva del proyecto	20
Periodo de pago de la inversión (años)		20
Declinación anual de la producción de energía en %		0.5
Perdidas de energía en el sistema (%)		15
Costo de operación y mantenimiento (€/Kwh)		0.035
Incremento anual de los costos de operación (%)		5
Tipo de cambio (peso/€)		17.89

Fuente: Elaboración propia en base a datos de The Economics of Wind Energy. 2009

<sup>27</sup> Vélez, Ignacio: Evaluación de proyectos. Politécnico Grancolombiano. Bogotá Colombia, 2003.

<sup>28</sup> Vélez, Ignacio: Decisiones bajo riesgo e incertidumbre. 1er edición. Politécnico Grancolombiano. Bogotá Colombia, Enero de 2003

<sup>29</sup> Ferrando F. (1993). Aspectos Económicos, en Principios de Conversión de la Energía Eólica. Madrid: CIEMAT.

Según el National Renewable Energy Laboratory NREL en un estudio del 2009 <sup>(31)</sup>, la tasa de interés para este tipo de proyectos fluctúan alrededor del 5 a 10 % y la tasa de descuento en la misma proporción. Sin embargo este valor es para países de Europa, para México se puede calcular mediante el uso de la Tasa de interés interbancario (TIE) sumándole 4 - 6 puntos porcentuales y la inflación para hacerla más segura.

Datos del Banco de México dan una TIE de diciembre, 2009 a septiembre, 2010 de 4.93 a 4.78% y una tasa de inflación de 4.40 % para el 2010. Con estos datos queda una tasa de interés del 14 %.

La tasa de descuento se puede calcular mediante el uso de la calificación riesgo país, sumándole la tasa de los bonos de la Reserva Federal del Tesoro (FED) a 30 años ya que estas se consideran muy seguras y la tasa de inflación. Según CESLA 2011 Economía Latinoamericana, la calificación de riesgo país para México, se situó de 2005 al 27 de septiembre, 2011 de 164 a 229 y al 10 de octubre, 2011 en 250 puntos (2.5 %).

La tasa de interés para los bonos a 30 años es de 3.179 % al 20 de septiembre, 2011. Con los datos anteriores se estima una tasa de descuento mínima del 10 %. En este trabajo se utilizan 14 y 10 % para la tasa de interés y descuento respectivamente.

El periodo de vida de las turbinas eólicas marinas es de 25 a 30 años y para tierra es de 15 a 20 años, aquí se selecciona una vida útil de 20 años.

El periodo de pago se selecciona de 20 años, por así convenir para la evaluación del proyecto, pero comúnmente se establece en menor tiempo de 7 a 10 años sin embargo los flujos de efectivo saldrían negativos por varios periodos.

También se puede incluir el costo de recuperación de la instalación, es decir la venta de los equipos al final de la vida del proyecto, que por lo regular anda alrededor de 20% de la inversión inicial, sin embargo en esta evaluación se decide no incluirlo ya que no se tiene certeza que se recuperen los equipos. Pero es obvio que si se incluye los indicadores de rentabilidad resultan más atractivos.

No existen datos de declinación en la producción de energía por disminución de eficiencia de la maquina y los sistemas auxiliares que componen la central eólica sin embargo se selecciona un 0.5% anual para efectos de hacer más real la evaluación. En cuanto a pérdidas de energía en el sistema fluctúa alrededor del 10 – 15% aquí se selecciona 15%.

Según el The Economics of Wind Energy, 2009 los costos de operación y mantenimiento fluctúan alrededor de 0.012 – 0.015 €/Kwh generado sin embargo se han dado casos en algunos países de hasta 0.035 €/Kwh, aquí se selecciona este último y se asume un incremento en los costos del 5% anual ya que están sometidos al efecto de la inflación. En la tabla siguiente se muestran los conceptos que componen los costos de operación y mantenimiento.

Concepto	Porcentaje del total
Servicio y piezas de repuesto	26
Administración	21
Renta del terreno	18
Varios	17
Seguros	13
Potencia de la red	5

Fuente: Elaboración propia en base a datos de The Economics of Wind Energy. 2009



Para efectos de la evaluación económica se usaran la moneda en euros ya que la mayoría de las empresas a nivel mundial así lo manejan, sin embargo se puede efectuar una conversión rápida a pesos con el factor dado pero esto sería una aproximación ya que el tipo de cambio fluctúa muy rápidamente.

De acuerdo a lo planteado para la evaluación del proyecto, se compara la generación de energía eléctrica a partir del viento contra la generada por un motor diesel, a continuación se muestra los datos de rendimiento y costos del combustible como premisas para efectuar la comparación.

Potencia del Motor diesel en Kw al 75% de carga**	772.50
Consumo de combustible( lts/hr)	201
Consumo de combustible( lts/Kwh)	0.26
Precio diesel (€/lts)	0.59
Incremento del precio del combustible (%)	5

Los datos de rendimiento y consumo de combustible varían con el porcentaje de carga del motor y pueden ser diferentes ya que no trabajan a carga constante sin embargo para efectos de evaluación se asumirá, aunque esto genere cierto porcentaje de error, que el motor diesel trabaja en todo momento al 75% de carga, en términos reales con estos datos de rendimiento se tiene un consumo de combustible de 0.26 lts/kwh.

En un artículo escrito por Notton <sup>(32)</sup> se pueden encontrar unas ecuaciones que expresan el comportamiento lineal del consumo de combustible en motores diesel. Para grupos diesel de 1500 rpm, el consumo se encuentra generalmente entre 0.30 y 0.45 lts/kWh. Con potencias alrededor de 5 kVA se tiene un consumo de aproximadamente 0.42 lts/kWh, para potencias superiores este valor puede bajar hasta los 0.3 lts/kWh indicados. Este valor se considera válido para todo el margen de potencias de sistemas diesel centrales, aunque para potencias superiores a 50 kVA pueda caer a 0.25 lts/kWh.

El generador mencionado en el punto 3.2 es de 1010 KW con un factor de potencia de 0.80 lo cual da 1263 KVA lo que según Notton se tendría un consumo de combustible de 0.25 lts/KWh muy cercano al de 0.26 lts/Kwh seleccionado en nuestra evaluación.

Para la evaluación de nuestro proyecto se tomaran los ingresos como el costo del combustible ahorrado al dejar de utilizar parcialmente los motores diesel y generar la energía eléctrica con las turbinas eólicas, por tanto se asume un costo del lt de combustible de 10 pesos mexicanos y se asume un tipo de cambio de 17.89 pesos por euro. También se selecciona un incremento en los costos de combustible del 5% anual ya que también están sometidos a aumentos.

<sup>30</sup> Solórzano, Napoleón L. Criterios de rentabilidad económica para la administración de empresas petroleras de exploración y producción, primera edición. México D.F, 1996

<sup>31</sup> Renewable Energy Project Financing: Impacts of the Financial Crisis and Federal Legislation, Paul Schwabe, Karlynn Cory, and James Newcomb. Technical Report National Renewable Energy Laboratory, July 2009

<sup>32</sup> Notton G. et al (1997). What hypothesis for an economic study of electric generators for rural area? Literature survey and new suggestions, 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Volumen II. Barcelona, 30 junio-4 julio. Munich: Editado por WIP y H.S. Stephens & Associates

### 4.3.1 Evaluación económica para turbina VERGNET GEV HP – 1.0 MW

Para el caso en específico se resumen los costos en la siguiente tabla.

Resumen de costos del proyecto eólico para Turbina VERGNET GEV HP-1.0 MW	
Concepto	Inversión
Fabricación de Turbina, transporte y montaje	815
Estación de transformación y cable para distribución	270
Interconexión a la RED	85
Construcción de base	350
Diseño y dirección del proyecto	100
Análisis del medio ambiente	50
Financiamiento	15
Varios	20
25% adicional	426.25
<b>Total</b>	<b>2131.25</b>

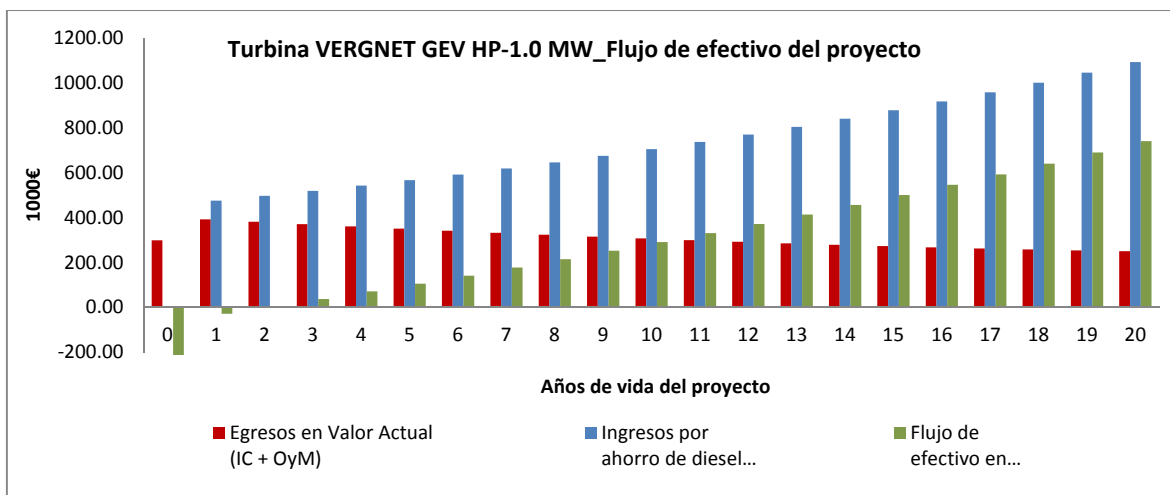
Fuente: Elaboración propia en base a datos de The Economics of Wind Energy. 2009

Con estos datos, la producción anual de energía y las premisas de se integra la evaluación del proyecto. Los resultados de la siguiente tabla se obtienen al amortizar el proyecto por el método de unidades de producción.

Turbina VERGNET GEV HP-1.0 MW_Tabla de amortización y evaluación costo - beneficio del proyecto por el metodo de unidades de producción														
Periodo anual	Energía producida anual en Kwh	Pago a Capital	Saldo Insoluto	Intereses del capital (IC)	Costos unitario OyM	Costos anual Oy M	Egresos (IC+OyM)	Egresos en Valor Actual (IC+OyM)	Combustible ahorrado	Precio anual promedio del diesel	Ingresos por ahorro de diesel	Ingresos por ahorro de diesel en Valor Actual	Flujo de efectivo	Flujo de efectivo en valor actual
		1,000 €	1,000 €	1,000 €	(€/Kwh)	1,000 €	1,000 €	1,000 €	Its Diesel	(€/Its)	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €
0	0	0.00	2131.25	298.38	0.000	0.00	298.38	298.38	0.00	0.56	0.00	0.00	-298.38	-298.38
1	3112272	111.71	2019.54	282.74	0.035	108.93	391.66	356.06	809795.07	0.59	475.28	432.08	-28.09	-35.69
2	3096711	111.15	1908.38	267.17	0.037	113.80	380.98	314.86	805746.09	0.62	496.55	410.38	4.42	-15.64
3	3081227	110.60	1797.78	251.69	0.039	118.90	370.59	278.43	801717.36	0.65	518.77	389.76	37.59	0.74
4	3065821	110.05	1687.74	236.28	0.041	124.22	360.50	246.23	797708.77	0.68	541.99	370.19	71.44	13.91
5	3050492	109.50	1578.24	220.95	0.043	129.78	350.73	217.78	793720.23	0.71	566.24	351.59	106.02	24.32
6	3035239	108.95	1469.29	205.70	0.045	135.58	341.28	192.65	789751.63	0.75	591.58	333.93	141.35	32.34
7	3020063	108.40	1360.89	190.52	0.047	141.65	332.18	170.46	785802.87	0.79	618.06	317.16	177.48	38.30
8	3004963	107.86	1253.03	175.42	0.049	147.99	323.41	150.88	781873.86	0.83	645.71	301.23	214.44	42.49
9	2989938	107.32	1145.71	160.40	0.052	154.61	315.01	133.60	777964.49	0.87	674.61	286.10	252.28	45.18
10	2974988	106.79	1038.92	145.45	0.054	161.53	306.98	118.35	774074.66	0.91	704.80	271.73	291.03	46.59
11	2960114	106.25	932.67	130.57	0.057	168.76	299.33	104.91	770204.29	0.96	736.34	258.08	330.75	46.92
12	2945313	105.72	826.95	115.77	0.060	176.31	292.09	93.07	766353.27	1.00	769.29	245.12	371.49	46.33
13	2930586	105.19	721.76	101.05	0.063	184.20	285.25	82.63	762521.50	1.05	803.72	232.81	413.28	44.99
14	2915933	104.67	617.09	86.39	0.066	192.44	278.84	73.43	758708.89	1.11	839.68	221.11	456.18	43.02
15	2901354	104.14	512.95	71.81	0.069	201.06	272.87	65.32	754915.35	1.16	877.26	210.01	500.25	40.54
16	2886847	103.62	409.33	57.31	0.073	210.05	267.36	58.19	751140.77	1.22	916.52	199.46	545.53	37.65
17	2872413	103.10	306.23	42.87	0.076	219.45	262.33	51.90	747385.07	1.28	957.53	189.44	592.10	34.44
18	2858051	102.59	203.64	28.51	0.080	229.27	257.78	46.36	743648.14	1.35	1000.38	179.93	640.01	30.97
19	2843760	102.07	101.56	14.22	0.084	239.53	253.75	41.49	739929.90	1.41	1045.15	170.89	689.32	27.32
20	2829542	101.56	0.00	0.00	0.088	250.25	250.25	37.20	736230.25	1.48	1091.92	162.31	740.10	23.54
<b>Total</b>	<b>59375628</b>	<b>2131.25</b>						<b>3132.15</b>				<b>5533.31</b>		<b>269.91</b>

Fuente: Elaboración propia

La grafica siguiente muestra el flujo de efectivo neto del proyecto, se observa que desde el inicio de producción se tiene un flujo de efectivo positivo.



Fuente: Elaboración propia

Por último se muestra la tabla con los indicadores de rentabilidad del proyecto.

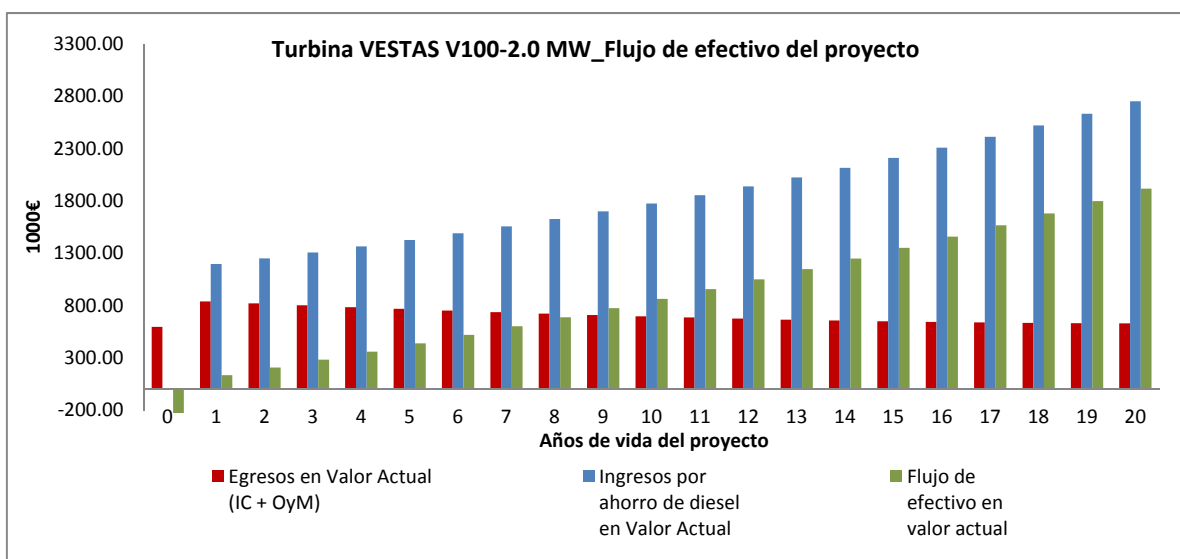
Indicadores económicos	
Inversión (1000€)	2131.25
VPN (1000€) @ 8 %	269.91
Tasa interna de retorno (%)	11.08
Relación costo - beneficio	1.05
Tiempo de recuperación (años)	13.10

#### 4.3.2 Evaluación económica para turbina VESTAS: V100-2.0 MW GridStreamer™

Resumen de costos del proyecto eólico para Turbina VESTAS V100-2.0 MW	
Concepto	Inversión
Fabricación de Turbina, transporte y montaje	1630
Estación de transformación y cable para distribución	540
Interconexión a la RED	170
Construcción de base	700
Diseño y dirección del proyecto	200
Análisis del medio ambiente	100
Financiamiento	30
Varios	40
25% adicional	852.5
<b>Total</b>	<b>4262.5</b>

Fuente: Elaboración propia en base a datos de The Economics of Wind Energy. 2009

Turbina VESTAS V100-2.0 MW_Tabla de amortización y evaluación costo - beneficio del proyecto por el metodo de unidades de producción														
Periodo anual	Energía producida anual en Kwh	Pago a Capital	Saldo Insoluto	Intereses del capital (IC)	Costos unitario O y M	Costos anual O y M	Egresos (IC + OyM)	Egresos en Valor Actual (IC + OyM)	Combustible ahorrado	Precio anual promedio del diesel	Ingresos por ahorro de diesel	Ingresos por ahorro de diesel en Valor Actual	Flujo de efectivo	Flujo de efectivo en valor actual
		1,000 €	1,000 €	1,000 €	(€/Kwh)	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	Its Diesel	(€/Its)	1,000 €	1,000 €	1,000 €
0	0	0.00	4262.50	596.75	0.000	0.00	596.75	596.75	0.00	0.56	0.00	0.00	-596.75	-596.75
1	7844754	223.43	4039.07	565.47	0.035	274.57	840.04	763.67	2041159.29	0.59	1198.00	1089.09	134.53	101.99
2	7805530	222.31	3816.77	534.35	0.037	286.85	821.20	678.68	2030953.49	0.62	1251.61	1034.39	208.10	133.40
3	7766503	221.20	3595.57	503.38	0.039	299.69	803.07	603.36	2020798.72	0.65	1307.62	982.43	283.35	157.88
4	7727670	220.09	3375.48	472.57	0.041	313.10	785.67	536.62	2010694.73	0.68	1366.13	933.09	360.37	176.37
5	7689032	218.99	3156.49	441.91	0.043	327.11	769.02	477.50	2000641.25	0.71	1427.27	886.22	439.26	189.73
6	7650587	217.90	2938.59	411.40	0.045	341.75	753.15	425.14	1990638.05	0.75	1491.14	841.71	520.09	198.68
7	7612334	216.81	2721.78	381.05	0.047	357.04	738.09	378.76	1980684.86	0.79	1557.87	799.43	602.97	203.87
8	7574272	215.72	2506.06	350.85	0.049	373.02	723.87	337.69	1970781.43	0.83	1627.58	759.28	687.99	205.87
9	7536401	214.64	2291.42	320.80	0.052	389.71	710.51	301.33	1960927.53	0.87	1700.41	721.14	775.26	205.17
10	7498719	213.57	2077.85	290.90	0.054	407.15	698.05	269.13	1951122.89	0.91	1776.51	684.92	864.89	202.22
11	7461225	212.50	1865.34	261.15	0.057	425.37	686.52	240.62	1941367.27	0.96	1856.01	650.52	956.98	197.39
12	7423919	211.44	1653.90	231.55	0.060	444.41	675.96	215.38	1931660.44	1.00	1939.06	617.85	1051.67	191.02
13	7386799	210.38	1443.52	202.09	0.063	464.30	666.39	193.03	1922002.14	1.05	2025.84	586.81	1149.06	183.40
14	7349865	209.33	1234.19	172.79	0.066	485.07	657.86	173.24	1912392.13	1.11	2116.49	557.34	1249.30	174.77
15	7313116	208.28	1025.90	143.63	0.069	506.78	650.41	155.70	1902830.16	1.16	2211.21	529.35	1352.51	165.36
16	7276550	207.24	818.66	114.61	0.073	529.46	644.07	140.17	1893316.01	1.22	2310.16	502.76	1458.84	155.35
17	7240168	206.21	612.45	85.74	0.076	553.15	638.90	126.40	1883849.43	1.28	2413.54	477.51	1568.43	144.90
18	7203967	205.18	407.28	57.02	0.080	577.91	634.93	114.20	1874430.19	1.35	2521.54	453.52	1681.44	134.15
19	7167947	204.15	203.13	28.44	0.084	603.77	632.21	103.37	1865058.04	1.41	2634.38	430.74	1798.03	123.22
20	7132107	203.13	0.00	0.00	0.088	630.79	630.79	93.76	1855732.75	1.48	2752.27	409.11	1918.35	112.22
<b>Total</b>	<b>149661463</b>	<b>4262.50</b>					<b>6924.49</b>					<b>13947.19</b>		<b>2760.20</b>



Fuente: Elaboración propia

Indicadores económicos	
Inversión (1000€)	4262.50
VPN (1000€) @ 8 %	2760.20
Tasa interna de retorno (%)	15.29
Relación costo - beneficio	1.25
Tiempo de recuperación (años)	9.98

## 4.3.3 Evaluación económica para turbina VESTAS V112-3.0 MW OFFSHORE

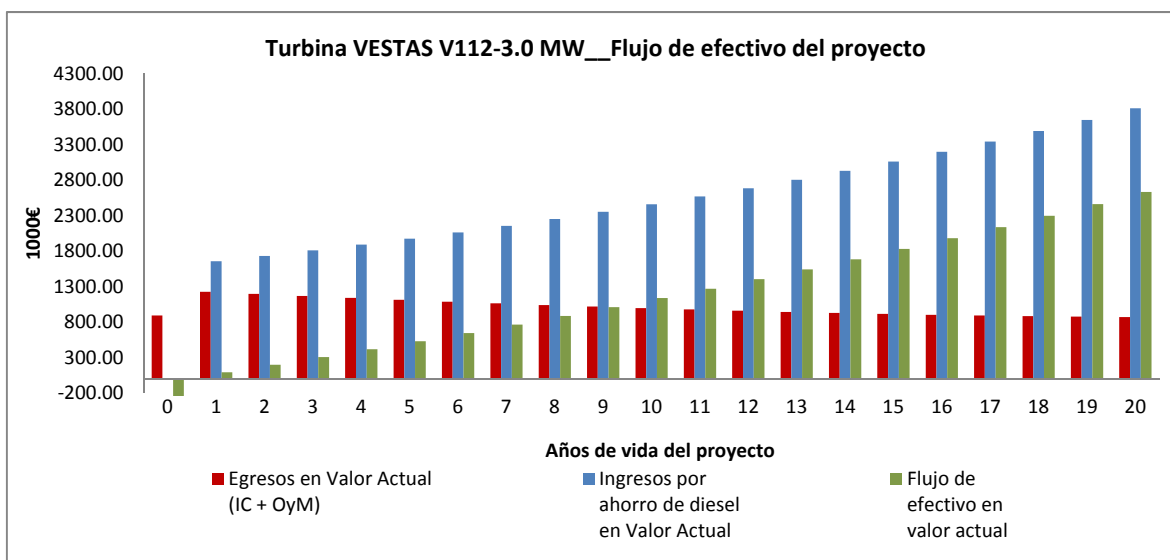
Resumen de costos del proyecto eólico para Turbina VESTAS V112-3.0 MW	
Concepto	Inversión
Fabricación de Turbina, transporte y montaje	2445
Estación de transformación y cable para distribución	810
Interconexión a la RED	255
Construcción de base	1050
Diseño y dirección del proyecto	300
Análisis del medio ambiente	150
Financiamiento	45
Varios	60
25% adicional	1278.75

**Total 6393.75**

Fuente: Elaboración propia en base a datos de The Economics of Wind Energy. 2009

Turbina VESTAS V112-3.0 MW _Tabla de amortización y evaluación costo - beneficio del proyecto por el metodo de unidades de producción														
Periodo anual	Energía producida anual en Kwh	Pago a Capital	Saldo Insoluto	Intereses del capital (IC)	Costos unitario OyM	Costos anual OyM	Egresos (IC+OyM)	Egresos en Valor Actual (IC+OyM)	Combustible ahorrado	Precio anual promedio del diesel	Ingresos por ahorro de diesel	Ingresos por ahorro de diesel en Valor Actual	Flujo de efectivo	Flujo de efectivo en valor actual
		1,000 €	1,000 €	1,000 €	(€/Kwh)	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	Its Diesel	(€/Its)	1,000 €	1,000 €	1,000 €
0	0	0.00	6393.75	895.13	0.000	0.00	895.13	895.13	0.00	0.56	0.00	0.00	-895.13	-895.13
1	10870152	335.14	6058.61	848.21	0.035	380.46	1228.66	1116.96	2828350.30	0.59	1660.02	1509.11	96.22	57.00
2	10815802	333.46	5725.15	801.52	0.037	397.48	1199.00	990.91	2814208.55	0.62	1734.30	1433.31	201.84	108.93
3	10761722	331.80	5393.35	755.07	0.039	415.27	1170.34	879.29	2800137.50	0.65	1811.91	1361.32	309.78	150.23
4	10707914	330.14	5063.21	708.85	0.041	433.85	1142.70	780.48	2786136.82	0.68	1892.99	1292.94	420.16	182.32
5	10654374	328.49	4734.73	662.86	0.043	453.27	1116.13	693.03	2772206.13	0.71	1977.71	1228.00	533.09	206.49
6	10601102	326.84	4407.88	617.10	0.045	473.55	1090.65	615.65	2758345.10	0.75	2066.21	1166.32	648.71	223.83
7	10548097	325.21	4082.67	571.57	0.047	494.74	1066.32	547.19	2744553.38	0.79	2158.67	1107.74	767.15	235.34
8	10495356	323.58	3759.09	526.27	0.049	516.88	1043.15	486.64	2730830.61	0.83	2255.27	1052.10	888.53	241.88
9	10442880	321.97	3437.13	481.20	0.052	540.01	1021.21	433.09	2717176.46	0.87	2356.19	999.26	1013.02	244.20
10	10390665	320.36	3116.77	436.35	0.054	564.18	1000.52	385.75	2703590.57	0.91	2461.63	949.07	1140.75	242.97
11	10338712	318.75	2798.02	391.72	0.057	589.42	981.15	343.89	2690072.62	0.96	2571.79	901.40	1271.89	238.76
12	10287018	317.16	2480.85	347.32	0.060	615.80	963.12	306.88	2676622.26	1.00	2686.88	856.12	1406.60	232.08
13	10235583	315.57	2165.28	303.14	0.063	643.36	946.50	274.17	2663239.15	1.05	2807.12	813.12	1545.05	223.38
14	10184405	314.00	1851.28	259.18	0.066	672.15	931.33	245.25	2649922.95	1.11	2932.74	772.28	1687.41	213.04
15	10133483	312.43	1538.86	215.44	0.069	702.23	917.67	219.68	2636673.34	1.16	3063.98	733.49	1833.88	201.38
16	10082816	310.86	1227.99	171.92	0.073	733.65	905.57	197.08	2623489.97	1.22	3201.09	696.65	1984.66	188.71
17	10032402	309.31	918.68	128.62	0.076	766.48	895.10	177.09	2610372.52	1.28	3344.34	661.66	2139.93	175.26
18	9982240	307.76	610.92	85.53	0.080	800.78	886.31	159.41	2597320.66	1.35	3494.00	628.43	2299.92	161.25
19	9932329	306.22	304.69	42.66	0.084	836.62	879.27	143.77	2584334.05	1.41	3650.35	596.86	2464.86	146.87
20	9882667	304.69	0.00	0.00	0.088	874.06	874.06	129.92	2571412.38	1.48	3813.71	566.88	2634.96	132.27
<b>Total</b>	<b>207379721</b>	<b>6393.75</b>					<b>10021.24</b>				<b>19326.05</b>		<b>2911.06</b>	

Fuente: Elaboración propia

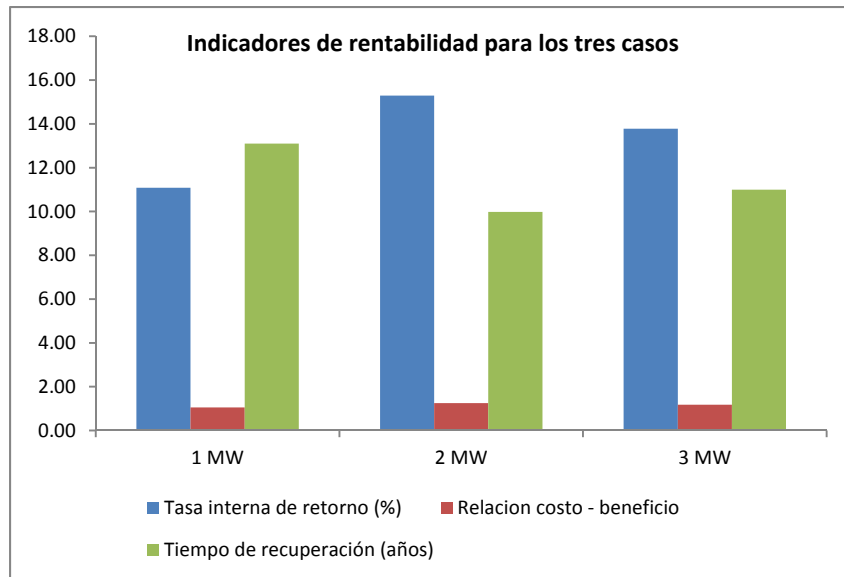
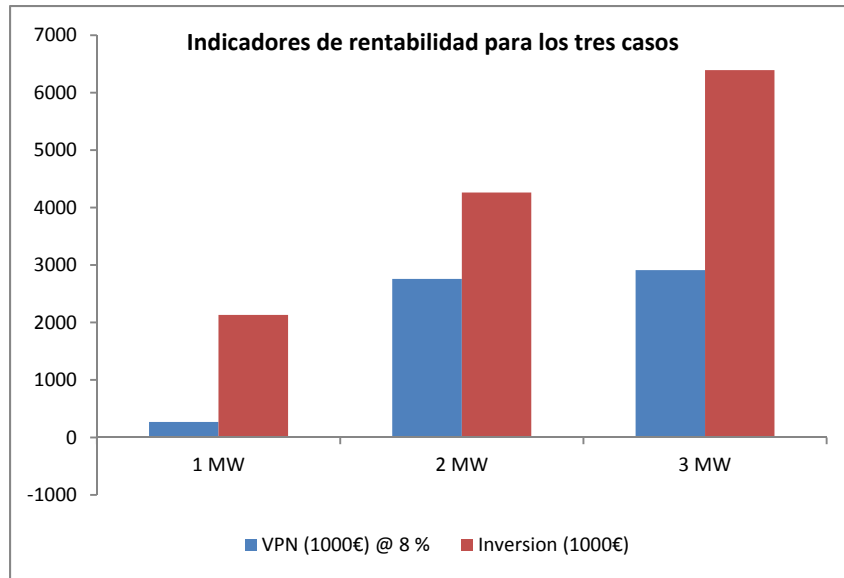


Fuente: Elaboración propia

Indicadores económicos	
Inversión (1000€)	6393.75
VPN (1000€) @ 8 %	2911.06
Tasa interna de retorno (%)	13.78
Relación costo - beneficio	1.18
Tiempo de recuperación (años)	11.00

#### 4.3.4 Resumen de evaluación

Resumen de Indicadores económicos para los tres casos			
Concepto	1 MW	2 MW	3 MW
<b>Inversión (1000€)</b>	2131	4263	6394
<b>VPN (1000€) @ 8 %</b>	270	2760	2911
<b>Tasa interna de retorno (%)</b>	11.08	15.29	13.78
<b>Relación costo - beneficio</b>	1.05	1.25	1.18
<b>Tiempo de recuperación (años)</b>	13.10	9.98	11.00



Fuente: Elaboración propia

Al analizar los indicadores de rentabilidad se observa que todas las turbinas son económicamente viables, sin embargo la turbina de 2 MW es la que arroja los mejores indicadores económicos.

Para la turbina de 2 MW el margen máximo de rentabilidad del proyecto se da con una tasa de descuento del 15.29 % ya que si se utiliza una tasa superior el VPN se vuelve negativo, con estos resultados, se garantiza una rentabilidad máxima para el inversionista de 15.29 % del monto invertido.

Por otro lado, el periodo de pago de la inversión se puede reducir, por ejemplo a 10 años, y los indicadores de rentabilidad mejoran, sin embargo el flujo de efectivo se vuelve negativo para los primeros periodos con lo cual se deberá planear conseguir dinero adicional para solventar esa falta de liquidez.

#### 4.4 Análisis de sensibilidad

Para efectuar el análisis de sensibilidad se hace variar el valor de las variables:

1. Inversión
2. Tasa de interés
3. Costos de operación y mantenimiento

En un 20% para llevar la evaluación económica al caso extremo.

Posterior se realiza la evaluación financiera con cada una de las variables, a continuación se muestra el resumen de la evaluación para el análisis de sensibilidad.

Análisis de sensibilidad _ Resumen de Indicadores económicos												
	Base			Inversión + 20%			Tasa de interés + 20%			Costos de operación y mantenimiento + 20%		
							Base = 14.00 % Sensibilidad = 16.80 %			Base = 0.035 Sensibilidad = 0.042		
Concepto	1 MW	2 MW	3 MW	1 MW	2 MW	3 MW	1 MW	2 MW	3 MW	1 MW	2 MW	3 MW
Inversión (1000€)	2131	4263	6394	2558	5115	7673	2131	4263	6394	2131	4263	6394
VPN (1000€)	270	2760	2911	-529	1162	514	-103	2015	1793	16	2121	2025
Tasa interna de retorno (%)	11.08	15.29	13.78	8.16	11.92	10.58	9.60	13.71	12.23	10.07	14.11	12.66
Relación costo - beneficio	1.05	1.25	1.18	0.91	1.09	1.03	0.98	1.17	1.10	1.00	1.18	1.12
Tiempo de recuperación (años)	13.10	9.98	11.00	15.83	12.39	13.53	14.34	11.05	12.13	14.00	10.75	11.82

Fuente: Elaboración propia

Al analizar los resultados se observa que el proyecto es muy sensible al cambio de variables ya que el VPN se vuelve negativo para la turbina de 1 MW al variar la inversión y la tasa de interés. Se ve también que la rentabilidad mínima es de 8.16 % para 1 MW en caso de la inversión y de 9.6 % en el caso de la tasa de interés.

La variable que más afecta a los indicadores es la inversión y en segundo y tercer término la tasa de interés y los costos de operación y mantenimiento respectivamente. La turbina de 2 MW sigue siendo la más viable financieramente con el análisis de sensibilidad.

Si se hacen variar las tres variables en un +15 % y se realiza la evaluación económica, el VPN se vuelve negativo para las turbinas de 1 y 3 MW y se tendría que bajar la tasa de descuento a 7.03 % para 1 MW y 9.41 % para la de 3 MW a fin de que el VPN se vuelva positivo, sin embargo los indicadores económicos se ven muy disminuidos. En el caso de la turbina de 2 MW la tasa máxima de rentabilidad sería de 10.74%.

La tabla siguiente resume el análisis de sensibilidad variando de una vez las tres variables en un + 15 %.



Análisis de sensibilidad _ Indicadores Económicos						
Concepto	Base			Inversión +15% Tasa de interés + 15% (16.10 %) Costos de operación y mantenimiento + 15% (0.403 €/Kwh)		
	1 MW	2 MW	3 MW	1 MW	2 MW	3 MW
<b>Inversión (1000€)</b>	2131	4263	6394	2451	4902	7353
<b>VPN (1000€) @ 10 %</b>	270	2760	2911	-841	439	-516
<b>Tasa interna de retorno (%)</b>	11.08	15.29	13.78	7.03	10.74	9.41
<b>Relación costo - beneficio</b>	1.05	1.25	1.18	0.87	1.03	0.97
<b>Tiempo de recuperación (años)</b>	13.10	9.98	11.00	16.87	13.36	14.53

Fuente: Elaboración propia

#### 4.5 Reducción de emisiones a la atmosfera de gases de efecto invernadero (GEI)

Si bien el beneficio económico se observa para proyectos de esta naturaleza y aunque la rentabilidad sea marginal, una empresa puede decidir invertir en estos si se plantean como estratégicos para el desarrollo de la empresa, derivado de esto, es importante mostrar las ventajas adicionales a la hora de implementar este tipo de energías limpias, una de las más notales es la reducción de emisión de gases contaminantes (GEI).

Para el caso en particular y como se mencionó anteriormente, la cuestión estratégica para una empresa petrolera sería un cambio de percepción ante la sociedad ya que dejaría de verse como una empresa netamente petrolera y tomaría un concepto de empresa energética.

Para el cálculo de los GEI se toma datos de Retscrenn International que nos proporciona el factor de emisiones de GEI, se considera la energía que genera cada turbina eólica y se compara con las emisiones de un generador diesel al generar la misma energía. El resultado, para cada turbina, se muestra en la tabla.

Los resultados nos muestran que se dejaría de emitir una cantidad considerable de GEI y como se comentó anteriormente esto puede hacer más rentable nuestro proyecto al poder acceder a los bonos de carbono. Que aunque solo están contemplados los países del anexo I del protocolo y México no está contemplado, dichos bonos se pueden negociar con los países que sí estén en el anexo mencionado.

La forma y el monto del bono se acuerdan en el momento en que se tienen los resultados de las emisiones de CO<sub>2</sub> (e) y dado que existen diferentes esquemas para el comercio de los bonos y diferentes sitios del mundo donde se pueden comprar y vender, existen precios diferentes por cada tonelada de CO<sub>2</sub> (e). Así se tiene que: según datos del Chicago Climate Exchange de 2005 el precio ha fluctuado entre \$0.90 - \$2.10 USD/tCO<sub>2</sub> (e) y datos del European Climate Exchange Carbon de 2005 el precio fluctuó entre €6.40 – €9.70 €/tCO<sub>2</sub> (e) y se prevé que para 2020 pueda estar en 20 – 25 USD/tCO<sub>2</sub> (e)<sup>(33)</sup>.

Para efectos de incluir la posible venta de bonos de carbono en el proyecto se muestra la siguiente tabla con los ingresos que resultarían en caso de venderlos, se toma un precio promedio de 10 €/tCO<sub>2</sub>.

Turbina (MW)	Energía Anual (Kwh)	GEI (ton GEI) Factor= 0.888 ton GEI**/MWh	Equivalente en autos livianos (5.46 ton GEI/ auto)	Bonos de CO <sub>2</sub> (1000€)
1.00	3112272	2764	506	27.64
2.00	7844754	6966	1276	69.66
3.00	10870152	9653	1768	96.53

\*\*El término CO<sub>2</sub> (e) es utilizado como equivalente de todos los gases de efecto invernadero (Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) – Potencial de calentamiento PC=1, Metano (CH<sub>4</sub>) PC= 21, Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O) PC= 292, Carburos Hidrofluorados (HFC) PC= 11,700, Perfluorados (PFC) PC= 6,700, Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) PC= 23,000), definidos en el protocolo de Kyoto en 1997<sup>(34)</sup>.

Fuente: Elaboración propia con datos de Retscrenn International, Análisis de proyectos de energía limpia. Ministerio de Recursos Naturales de Canadá 2006.

Estos datos son importantes si se analiza las emisiones de CO<sub>2</sub> de México que según datos del Centro de Estudios Latinoamericanos (CESLA) del 2008 son de 473226 ton de CO<sub>2</sub> siendo los más altos de los países de Latinoamérica y evidentemente se requiere de una estrategia para disminuir estas emisiones.

En cualquier caso, con los resultados obtenidos, se confirma la viabilidad financiera y se cierra el ciclo de evaluación técnico – financiero, resultando en que estos proyectos son atractivos para desarrollarlos en el área de estudio.

<sup>33</sup> Report of the Secretary-General's: High-level Advisory Group on Climate Change Financing. United Nations, Noviembre, 2010.

<sup>34</sup> Martínez, Julia, Fernández Adrián. Cambio climático: una visión desde México. Secretaría de Medio Ambiente, INE, 2004.

## Conclusiones

Derivado de la declinación en las reservas mundiales y más preocupante aun en las reservas nacionales de hidrocarburos se hace evidente la búsqueda y desarrollo intensivo de nuevas fuentes alternas de energía. Durante el desarrollo de esta tesis se analizaron los elementos necesarios que nos proporcionan las bases para afirmar que la energía eólica es adecuada y viable, desde el punto de vista ambiental y económico, como fuente alterna de energía.

Al analizar los elementos que nos indican que el medio ambiente ha tenido un deterioro considerable debido al uso de combustibles fósiles utilizados para la generación de energía eléctrica y observando los resultados de las evaluaciones a la energía eólica como fuente alterna, tanto técnica como económicamente, se hace aún más evidente que debemos apuntar nuestros esfuerzos al desarrollo e implantación de este tipo de energía a fin de dar un descanso a nuestro planeta y contar con alternativas para suplir nuestra demanda futura de energía.

De las evaluaciones del potencial eólico para la Sonda de Campeche y Litoral de Tabasco, se observa que es un área con grandes oportunidades para el desarrollo de este tipo de energía, por lo tanto se propone como área de estudio para análisis más a detalle que incluyan todas las estaciones meteorológicas y la información histórica para una mejor caracterización de la zona.

Al efectuar los análisis económicos para las tres turbinas seleccionadas se observa que para el caso en estudio la turbina de 2 MW es la más adecuada ya que los indicadores económicos son los mejores para este caso. Sin embargo si se quiere efectuar un proyecto de generación de energía eléctrica y vender esta energía a un tercero, lo más adecuado es utilizar turbinas de mayor potencia. En las zonas marinas se recomienda turbinas eólicas de 3 MW como mínimo para que el proyecto sea lo más rentable posible.

El caso analizado es algo fuera de lo común ya que la energía que se genere, se pretende utilizar para suministro a plataformas petroleras, efectuando la evaluación contra el ahorro en combustible diesel que se deje de utilizar. Es por esto que los indicadores económicos son moderados para el caso en estudio, sin embargo para el caso de una instalación que venda la energía generada a un tercero la evaluación económica arrojará indicadores mucho más rentables.

Para el caso en estudio las ventajas, además de lo económico, son que se dejarán de emitir a la atmósfera grandes cantidades de gases de efecto de invernadero además de que, de llegarse a realizar se podría tener acceso a los bonos de carbono con el subsecuente beneficio económico adicional al que ya se tiene.

El estudio realizado en esta tesis indica la factibilidad del potencial eólico de la Sonda de Campeche y el Litoral de Tabasco que es idóneo para instalar centrales que generen electricidad, ya sea para suministro de plataformas petroleras o a poblaciones cercanas a la costa. Sin embargo al llevar a cabo un proyecto de esta naturaleza se deben realizar estudios más especializados e ingeniería de detalle para aterrizar más las variables que intervienen en un proyecto de esta naturaleza. Queda para trabajos futuros y más especializados la ingeniería de detalle de la cimentación y montaje de la estructura para sostener a la turbina, la interconexión a la red y el sistema de control.

# Referencias

**BP Statistical Review of World Energy**, June 2011

**Key World Energy Statistics**. International Energy Agency, 2010

**CRUDE OIL THE SUPPLY OUTLOOK**. Report to the Energy Watch Group, Octubre 2007

**World Energy Outlook**. International Energy Agency, 2010

**45% By 2030, Towards a truly sustainable energy system in the EU**. Consejo Europeo de Energías Renovables, Mayo 2011

**The Economics of Wind Energy**. A report by the European Wind Energy Association, 2009.

**Renewable Energy Project Financing: Impacts of the Financial Crisis and Federal Legislation**, Paul Schwabe, Karlynn Cory, and James Newcomb. Technical Report National Renewable Energy Laboratory, July 2009.

**PRIVATE FINANCING OF RENEWABLE ENERGY: A GUIDE FOR POLICY MAKERS**. Sophie Justice. Renewable Energy Finance Project, December 2009.

**Pure Power: Wind energy targets for 2020 and 2030**. A report by the European Wind Energy Association, 2011

**Half-year Report**. The World Wind Energy Association, 2011

**Base de datos**. World Wind Energy Association, 2009

**Renewable Global Status Report**. International Energy Agency, 2006 Update

**World Wind Energy Report, 2010**. World Wind Energy Association WWEA, April 2011

**Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables**. Secretaría de Energía, Agosto 2009

**Revolución Energética, Perspectiva Mundial de la Energía Renovable**. Greenpeace Internacional, Consejo Europeo de Energías Renovables (EREC), Enero 2007.

**Elementos para la Promoción de la Energía Eólica en México**. Arturo Romero Paredes, Ana Delia Córdova, Rubén Guizar, Moisés Lino, Manuel Luengo y Mark Oven. PA Government Services, Inc. Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional, Marzo 2009.

**La Energía Eólica en México**, Informe del proyecto TECH4CDM, 2009. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) de España

A. Moragues Jaime y Rapallini T. Alfredo. **Aspectos Ambientales de la Energía Eólica**, 2002

Mercado F. Alejandro. **Perspectivas de la integración energética en América Latina**, 2009.

Pérez Le Fort Martín Alonso, Chacón Morales María Alejandra. **Seguridad energética: perspectivas de una visión nacional, regional y vecinal**, Junio 2006.

Fernández Díez Pedro. **Energía eólica**. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad De Cantabria, 2004.

Pinilla S. Alvaro, Ph.D. **Manual de Aplicación de la Energía Eólica**. Ministerio de Minas Y Energía, Instituto De Ciencias Nucleares Y Anergias Alternativas, Julio 1997.

Lecuona Neumann Antonio. **La energía eólica: Principios básicos y tecnología**. Escuela Politécnica Superior, Departamento de Ingeniería, Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2002.

Mur Amada Joaquín. **CURSO DE ENERGÍA EÓLICA**. Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza, 2005.

Escudero López. José María. **Manual de Energía Eólica**. 2da Edición, Madrid. Ediciones Mundi Prensa, 2008

Villarrubia Miguel, **Energía Eólica**. Barcelona España. Ediciones CEAC, 2004

Burton Tony. **Wind Energy HandBook**, 3er Reimpresión, Inglaterra. John Wiley and Sons Ltd. 2001

**Anuario Estadístico de Petróleos Mexicanos, 2011. Capitulo II. Exploración y Producción.**

D. Elliott, M. Schwartz. **Wind Resource Assessment**. NREL Golden, Colorado. Ago 2006

Marc N. Schwartz, Dennis L. Elliott. **México Wind Resource Assessment Project**. Windpower '95, Washington, D. C. Marzo 1995

**INTERNATIONAL STANDARD 64100 – 1 WIND TURBINES, 2005**. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC)

Amador Guerra, Julio. **ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS TÉCNICOS EN LA APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA A LA INTEGRACIÓN REGIONAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN LA PRODUCCIÓN DESCENTRALIZADA DE ELECTRICIDAD**. Tesis Doctoral, Madrid España 2000.

Ferrando F. (1993). **Aspectos Económicos, en Principios de Conversión de la Energía Eólica**. Madrid: CIEMAT.

Solórzano, Napoleón L. **Criterios de rentabilidad económica para la administración de empresas petroleras de exploración y producción**. Primera edición. México D.F, 1996,

**Premisas 2004-2018 para la Evaluación económica de proyectos de inversión**, PEMEX EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN, Gerencia de Reservas. 2003

Notton G. et al (1997). **What hypothesis for an economic study of electric generators for rural area? Literature survey and new suggestions**, 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Volumen II. Barcelona, 30 junio-4 julio. Munich: Editado por WIP y H. S. Stephens & Associates

Vélez, Ignacio: **Decisiones bajo riesgo e incertidumbre. Primera edición. Politécnico Grancolombiano**. Bogotá Colombia, Enero de 2003

Vélez, Ignacio. **Evaluación de proyectos**. Politécnico Grancolombiano. Bogotá Colombia, 2003.

Pérez Mayedo Yaité, **EVALUACIÓN FINANCIERA DE UN PROYECTO DE INVERSIÓN**, UNIVERSIDAD VLADIMIR ILICH LENIN. 2010.

**Análisis de proyectos de energía limpia**. Retscrenn International, Ministerio de Recursos Naturales de Canadá, 2006

Martínez, Julia, Fernández Adrián. **Cambio climático: una visión desde México**. Secretaria de Medio Ambiente. INE, 2004.

**High-level Advisory Group on Climate Change Financing**. Report of the Secretary-General's, United Nations. Noviembre, 2010