



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE SISTEMA DE GENERACIÓN POR MEDIO DE  
AEROGENERADOR DE TURBINA EÓLICA, PARA SUMINISTRO DE ELECTRICIDAD  
A UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA DEL MUNICIPIO DE MIXCO**

**Amilcar Estuardo Orozco Orozco**

Asesorado por el Msc. Ing. Jorge Ivan Cifuentes Castillo

Guatemala, mayo de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE SISTEMA DE GENERACIÓN POR MEDIO DE  
AEROGENERADOR DE TURBINA EÓLICA, PARA SUMINISTRO DE ELECTRICIDAD  
A UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA DEL MUNICIPIO DE MIXCO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**AMILCAR ESTUARDO OROZCO OROZCO**  
ASESORADO POR EL MSC. ING. JORGE IVAN CIFUENTES CASTILLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, MAYO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino González
EXAMINADOR	Ing. Carlos Francisco Gressi López
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE SISTEMA DE GENERACIÓN POR MEDIO DE  
AEROGENERADOR DE TURBINA EÓLICA, PARA SUMINISTRO DE ELECTRICIDAD  
A UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA DEL MUNICIPIO DE MIXCO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 24 de marzo de 2013.

**Amilcar Estuardo Orozco Orozco**



**USAC**  
**TRICENTENARIA**  
 Universidad de San Carlos de Guatemala



**Escuela de Estudios de Postgrado**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Teléfono 2418-9142 / Ext. 86226**

**MOD-MEAPP-0001-2014**

0 0 0 2 3 6

Guatemala, 24 de marzo de 2013.

Director:  
 Guillermo Antonio Puente Romero  
 Escuela de Ingeniería Electrónica  
 Presente.

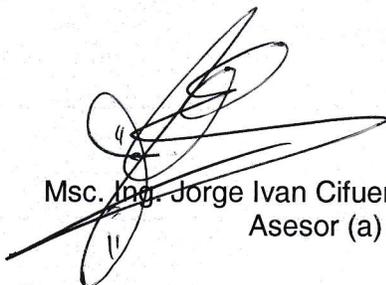
Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Amílcar Estuardo Orozco Orozco** con carné número **94-16447**, quien opto la modalidad del **"PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO"**. Previo a culminar sus estudios en la **Maestría en Energía y Ambiente**.

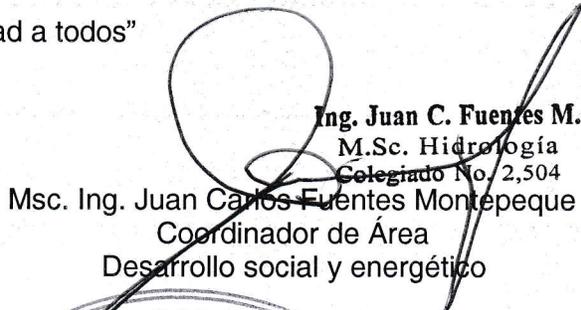
Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

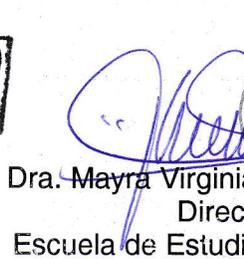
Sin otro particular, atentamente,

"Id y enseñad a todos"

  
 Msc. Ing. Jorge Ivan Cifuentes Castillo  
 Asesor (a)

**ING. JORGE IVAN CIFUENTES CASTILLO**  
**M.Sc NANOTECNOLOGIA**  
**COLEGIADO No. 3413**

  
**Ing. Juan C. Fuentes M.**  
 M.Sc. Hidrología  
 Colegiado No. 2,504  
 Msc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque  
 Coordinador de Área  
 Desarrollo social y energético

  
**Dra. Mayra Virginia Castillo Montes**  
 Directora  
 Escuela de Estudios de Postgrado



Cc: archivo  
 /db



FACULTAD DE INGENIERIA

Doctora  
Mayra Virginia Castillo Montes  
Directora Escuela de Postgrado  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Estimada Doctora Castillo:

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el protocolo del Diseño de Investigación, en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado Titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE SISTEMA DE GENERACIÓN POR MEDIO DE AEROGENERADOR DE TURBINA EÓLICA, PARA SUMINISTRO DE ELECTRICIDAD A UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA DEL MUNICIPIO DE MIXCO**, presentado por el estudiante universitario **Amilcar Estuardo Orozco Orozco**, considerando que ha cumplido con los requisitos establecidos por la Facultad de Ingeniería se procede a darle su aprobación.

*TO Y ENSEÑAD A TODOS*

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE SISTEMA DE GENERACIÓN POR MEDIO DE AEROGENERADOR DE TURBINA EÓLICA, PARA SUMINISTRO DE ELECTRICIDAD A UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA DEL MUNICIPIO DE MIXCO,** presentado por el estudiante universitario: **Amilcar Estuardo Orozco Orozco** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, mayo de 2014

/cc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	A Él sea la gloria y la honra, que por su infinita gracia y amor me llenó de sabiduría para alcanzar este triunfo tan anhelado.
<b>Mi madre</b>	Audelina de Orozco. Gracias por creer en mí, por su gran amor incondicional y que con su ejemplo de lucha ha sido siempre mi inspiración a seguir adelante.
<b>Mi padre</b>	Federico Orozco, que en paz descanse.
<b>Mis hermanos</b>	Rosmery, Walter, Yliana y Luis. Gracias por sus cariños y motivaciones que me dieron para culminar esta carrera universitaria.
<b>Mis sobrinos</b>	Con mucho cariño y aprecio.
<b>Mi familia en general</b>	Tíos, primos y cuñados con cariño fraternal.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XI
INTRODUCCIÓN .....	XIII
1. ANTECEDENTES .....	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	5
3. JUSTIFICACIÓN .....	9
4. OBJETIVOS .....	11
5. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIONES.....	13
6. ALCANCES .....	15
7. MARCO TEÓRICO.....	17
7.1. Energía renovable .....	17
7.2. Energía eólica.....	18
7.3. Tipos de vientos .....	19
7.4. Sistemas eólicos.....	21
7.5. Torre.....	24
7.6. Generador .....	25

7.7.	Parque eólico .....	25
7.8.	Parques eólicos interconectados .....	26
7.9.	Parques eólicos con consumos asociados (autoconsumo).....	26
7.10.	Aerogeneradores .....	26
7.11.	Clasificación de los aerogeneradores eólicos .....	26
7.12.	Clasificación de los aerogeneradores de acuerdo a su potencia.....	28
7.12.1.	Microturbinas (< 3 kW) .....	29
7.12.2.	Pequeños aerogeneradores (< 50 kW) .....	29
7.12.3.	Grandes aerogeneradores (< 850 kW).....	30
7.12.4.	Aerogeneradores multimegavat (1 y 3 MW).....	31
7.13.	Funcionamiento de un aerogenerador .....	31
7.14.	Selección del emplazamiento.....	32
7.15.	Bombeo de agua utilizando turbinas eólicas .....	33
7.16.	Tipos de turbinas eólicas para bombeo de agua.....	34
7.17.	Tipos de bombas utilizadas para bombeo de agua .....	35
7.18.	Bombeo y compresión de aire.....	36
7.19.	Bombas de diafragma .....	37
7.20.	Bombas de engranes .....	37
7.21.	Sistemas aislados .....	38
8.	ÍNDICE GENERAL.....	41
9.	METODOLOGÍA .....	45
9.1.	Descripción de la investigación .....	45
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN .....	51
11.	CRONOGRAMA .....	53

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	55
BIBLIOGRAFÍA.....	57



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## TABLAS

I.	Presupuesto .....	55
----	-------------------	----



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>A</b>	Amperio
<b>°</b>	Grados
<b>Hp</b>	<i>Horse Power</i>
<b>kW</b>	Kilowatt
<b>MW</b>	Megawatt
<b>%</b>	Porcentaje
<b>Q</b>	Quetzales
<b>V</b>	Voltio
<b>W</b>	Watts



## GLOSARIO

<b>Corriente alterna</b>	Es la corriente eléctrica en la que la magnitud y dirección varían cíclicamente.
<b>Corriente directa</b>	Es la corriente eléctrica cuyas cargas o electrones fluyen en una misma dirección.
<b>Radiación</b>	Consiste en la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas.
<b>Voltaje (tensión)</b>	Es una magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos.



## RESUMEN

Para desarrollar este trabajo investigativo se describirá en el capítulo 1 cómo se está desarrollando la energía eólica a nivel mundial, el impacto que se tiene en la matriz energética este tipo de energía renovable, se describirá cómo se está desarrollando en Centro América este tipo de energía y los lugares más óptimos para generar energía a mayor escala. En el capítulo 2 se describirá el aprovechamiento del recurso eólico y los diferentes tipos de vientos, los fundamentos aerodinámicos de las máquinas eólicas cargas y regulación, la orientación de los aerogeneradores que son los parques eólicos y los componentes de conversión de la energía eólica.

En el capítulo 3 se desarrollará el estudio técnico del viento, la obtención de datos meteorológicos, el cálculo de potencia del viento, métodos que se utilizan para medir el viento y sus informes para evaluar el recurso de la energía eólica y tratamiento estadístico de los datos. En el capítulo 4 se desarrollará el funcionamiento de los aerogeneradores, tecnologías actuales, el funcionamiento y las partes individuales que la conforman.

En el capítulo 5 se hará un análisis y evaluación del régimen eólico en el área de influencia, con descripción del área, técnicas, caracterización de terrenos, la orografía, rugosidad y perfil del viento, altura de montaje y emplazamiento. En el capítulo 6 se presentará el sistema de bombeo del área en estudio, cálculos de consumo y el estudio de como interconectarse a la red eléctrica pública, se analiza un sistema aislado, también se presenta el estudio económico para analizar la viabilidad de la investigación, y las implicaciones

que pueda tener el aerogenerador con respecto al impacto ambiental en el área de influencia.

## INTRODUCCIÓN

El potencial de energía eólica en Guatemala para generación eléctrica es de 7 800 MW (SWERA, 2005), este es potencial que aún no se ha estado aprovechando para la producción de energía eléctrica. A pesar de ser una fuente de energía renovable e inagotable, su desarrollo no ha tenido avances significativos, por tal razón el presente trabajo investigativo presenta una alternativa de cómo poder aprovechar el recurso del viento para suministrar electricidad en forma puntual a un sistema de bombeo de agua.

El problema es que el bombeo de agua en pozos mecánicos tiene un alto consumo de energía eléctrica y por ende genera gastos económicos para la Municipalidad de Mixco, dado que la corporación cuenta con más de 120 pozos que suministran de agua a las respectivas poblaciones de la Municipalidad (fuente Municipalidad de Mixco). Además, este aumento provoca mayor consumo de electricidad en la red eléctrica para estos sistemas dando como resultado que se contribuye a la problemática del aumento a los efectos del cambio climático.

Por tal razón, desarrollar este estudio traerá beneficio principalmente para la comuna de Mixco y una mitigación en cierta medida al aumento de los gases de efecto invernadero, dado a que se estaría reduciendo el consumo de electricidad en el sistema de bombeo de agua y, al ver los beneficios significativos, se podría implementar a otros pozos de la Municipalidad, provocando consigo un mayor ahorro económico y un alto potencial de energía renovable eólica utilizada para producir electricidad y suministrarlo a los sistemas de bombeo de agua.

Teniendo en cuenta el consumo de energía del bombeo de agua, el presente trabajo de investigación se centra en un estudio y diseño de un sistema mediante energía alternativa a través de un generador eólico para suministrar electricidad a una estación de bombeo para extraer el agua en uno de los pozos de la comuna de Mixco, ubicado en la colonia Lomas de Portugal.

Este pozo tiene una perforación aproximada de 1 600 pies de altura, cuya extracción del agua se hace con un motor eléctrico de 100 Hp, con una fuente alimentación de voltaje de 480V AC. (Fuente Municipalidad de Mixco).

En este trabajo investigativo será para una aplicación aislada por medio una pequeña o mediana potencia ya que el promedio del consumo de potencia que tiene una bomba eléctrica para la extracción de agua están entre 18,5 kW y 75 kW de potencia.

Además se incorporará al sistema un contador eléctrico bidireccional que consiste en un sistema de medición que permite a los usuarios que decidan autoabastecerse parcial o totalmente mediante sistemas de generación a base de fuentes renovables (solar o eólica), reciban del distribuidor un crédito en kWh, equivalente a la energía generada por el cliente, el cual se restará de la consumida por este en el período de facturación correspondiente, mientras, el medidor tiene la capacidad para contabilizar flujos de energía eléctrica en ambas direcciones o sea retiros e inyecciones.

## 1. ANTECEDENTES

El sector de la generación de electricidad a base de energía eólica ha estado aumentando año tras año. “Según estudios realizados la capacidad instalada a nivel mundial alcanzó los 196, 30 Megavatios, de los cuales 37 642 Megavatios fueron añadidos en 2010, cifra un poco menor que la de 2009”. (World Wind Energy Association , 2011, pág. 5). Esto significa que la energía eólica tuvo un crecimiento de 23,6 % en el 2010, a pesar de este crecimiento hace saber que es una de las tasas más bajas desde el 2004 y la segunda más baja de la década anterior. (World Wind Energy Association , 2011).

Todas las turbinas instaladas en el mundo durante el 2010 pueden generar 430 Teravatios hora por año, esto es más que la demanda eléctrica del Reino Unido, siendo esta la sexta economía más grande del mundo, e igualando el 2,5 % del consumo eléctrico a nivel mundial. En el 2010, 83 países, esto es uno más que en 2009, utilizaron la energía eólica para la generación eléctrica y 52 países incrementaron su capacidad instalada, luego de que 49 lo hicieran el año anterior. (World Wind Energy Association , 2011, pág. 5).

La energía eólica es una de las fuentes energéticas más antiguas, según la historia, por lo menos 3000 años antes de la era cristiana se utilizó principalmente para la navegación. Sin embargo, la historia enmarca que “en la edad media fue cuando se empezó a explorar mayores usos de esta fuente de energía utilizándolas para mover máquinas de nacientes industrias tales como la textil, maderera, metalúrgica. Siendo al principio molinos muy rudimentarios e

ineficientes con un eje colocado en forma vertical”. (Coordinación de Energías Renovables, 2008, pág. 5).

Ahora bien, inicialmente la energía del viento fue utilizada para producir energía mecánica, pero estas eran muy lentas y pesadas. A mediados del siglo pasado se desarrolló un molino que se impuso rápidamente en muchos países, llamándolo comúnmente molino americano. “Estos molinos son también un convertidor de energía mecánica, pero con una eficiencia muy superior a los de los anteriores y su uso es casi exclusivo para el bombeo de agua.” (Coordinación de Energías Renovables, 2008, pág. 5).

En muchos países de Latinoamérica están desarrollando proyectos con energía eólica para producir energía eléctrica y dentro de estos países se encuentra Chile, que según publicaciones del Ministerio de Energía hace saber que “en el año 2001, abrieron su primer parque eólico y conectado al sistema eléctrico de Aysen. Este parque eólico cuenta con tres aerogeneradores de 660 kW cada uno, es decir tienen una capacidad de generación en conjunto de aproximadamente 2 MW.” (Ministerio de Energía de Chile).

Además poseen un proyecto que se encuentra en operación en el archipiélago de Chiloé y que se encuentra en operación desde octubre del 2000, y este consta de un sistema híbrido eólico diesel que consta de dos aerogeneradores de 7,5 kW, cada uno y que ha beneficiado a los comunitarios de dicha isla. (Ministerio de Energía de Chile).

En Bogotá la Unidad de Planeación de Minería Energética realizó un documento que le llamo, “programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión, que dentro de este documento formuló una

guía para la utilización de la energía eólica para el bombeo de agua” (UPME, 2003). En dicho documento dan pautas generales para la decisión de uso de aerobombas para el suministro de agua en diversas aplicaciones. Ahora estos sistemas son equipos de baja velocidad y requieren de fuerzas altas para realizar la función de bombeo, es por eso que los rotores múltiparas americanos pueden llegar a tener 12, 18, 24 o aún 36 palas para su funcionamiento. Estos rotores se conocen técnicamente como rotor eólico de alta solidez, baja velocidad y alto momento par en el eje.

Santos (2006) realizó su proyecto de fin de carrera en la Universidad Pontificia Comillas España realizando un estudio de “optimización conjunta del bombeo y de la energía eólica en el contexto del mercado eléctrico.” El estudio se centra básicamente en impulsar agua de un depósito inferior a otro superior en una central hidroeléctrica realizándolos durante los períodos de baja demanda de electricidad a través de un parque eólico, y entregar a la red eléctrica la energía producida conjuntamente con la generación hidráulica en horas pico aprovechando de esta manera la generación de electricidad de ambos sistemas para la inyección al sistema de la red eléctrica de España.

En la Universidad Internacional de Andalucía Ana María Cerdán Cabrea realizó su tesis de maestría titulado “el diseño de un sistema de bombeo solar eólico para consumo de agua en Cabañas Ecoturísticas en la Pitaya, Veracruz.” (Cabrea, Ana María Cerdán, 2010), realizándolos en sitios donde el problema de los servicios de electrificación y agua potable no se encuentra disponible. La solución que planteo consiste en el diseño de un sistema de bombeo que funcione mediante energía solar y eólica con el cual se pueda trasladar del arroyo a la propiedad un volumen de agua suficiente para satisfacer las necesidades de huéspedes y áreas verdes. El estudio presentado como propuesta fue un arreglo de un sistema híbrido de 300 watts instalados con

paneles solares y cinco aerogeneradores pequeños para mantener el sistema de bombeo constante y aprovechar los recursos del área en estudio.

En lo que respecta al potencial eólico los estudios realizados establecen que “Guatemala cuenta con un potencial eólico para la generación eléctrica de 7,840 MW, en teoría y tomando como base las clases de viento del 3 al 7 m/s” (SWERA, 2005, pág. 47). Se han realizado mediciones de la velocidad del viento en siete lugares con potencial eólico en el territorio, y estos estudios muestran que el viento que cruza el territorio guatemalteco podría en el futuro ser una solución energética barata para el país. “El promedio anual de velocidad del viento en los siete sitios en los que el Ministerio de Energía y Minas (MEM) ha hecho mediciones varía entre los 5 y 7 metros por segundo, el rango mínimo para que una hélice genere electricidad es de 4 metros por segundo”. (Ministerio de Energía y Minas).

Para la comuna de Mixco realizar puntualmente un estudio de energía eólica sería de interés ya que por tener más de 120 sistemas de bombeo de agua en pozos podrá ser de gran beneficio ya que al ser viable la construcción de este tipo de sistema de generación eléctrica a base de aerogeneradores, podría implementarse en los demás pozos de agua y desarrollarse en donde se cumpla con los requerimientos necesarios para el aprovechamiento de la fuerza del aire.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El consumo de energía eléctrica para los sistemas de bombeo en pozos de agua dentro del municipio de Mixco va en aumento, esto es debido a que aumenta la cantidad de pozos perforados cada año, y sumando a ello que se perforan a mayores profundidades, provocando el problema de utilizar motores eléctricos de mayor capacidad en potencia y por ende mayor consumo de electricidad.

Dado los efectos que causa al medio ambiente la utilización de la energía convencional es necesario implementar proyectos en los que exista la contribución de energías renovables y entre uno de ellos está la energía eólica.

Por ello la presente investigación surgen a partir de preguntas como: ¿Es viable generar energía eléctrica a través de aerogeneradores de turbina eólica para en un sistema de bombeo de pozos del municipio de Mixco? ¿Cuál es el potencial eólico necesario para generar energía eléctrica? ¿Qué tipos de aerogeneradores se pueden utilizar para un sistema de bombeo? ¿Cuánta energía eléctrica se puede producir con un aerogenerador? ¿Es posible inyectar a la red pública eléctrica la energía generada? ¿Cuál es su impacto que pueda ocasionar en el paisaje la instalación de un aerogenerador?

Para dar respuestas a las preguntas anteriores surge la necesidad de investigar a profundidad el potencial eólico *in situ*, es decir estudiar las caracterizaciones y el comportamiento del viento en un área específico del municipio de Mixco, realizar un estudio de viabilidad del proyecto, plantear un nuevo sistema eléctrico y equipamiento que se adecue al sistema de

generación eólico, estudiar el impacto que pueda ocasionar al medio ambiente y paisaje y formular los resultados obtenidos para que de esta manera se pueda dar cumplimiento los objetivos propuestos en la línea de investigación.

En Guatemala la contribución de energías renovables todavía no es alta, a pesar de poseer muchas fuentes potenciales de recursos energéticos renovables y que hasta ahora no se han explotado en especial la energía eólica, que hoy por hoy no cuenta con proyectos de parques eólicos que se hayan realizado para generar energía eléctrica con dicha fuente.

En la actualidad se ha estado promoviendo la utilización de energías renovables para la generación de electricidad, y entre ellos se han realizado investigaciones sobre los puntos potenciales del viento en Guatemala para desarrollar proyectos de parques eólicos en la región, dando como resultados teóricos del potencial eólico en la región de 7,840 MW (SWERA, 2005).

Teniendo conocimiento del potencial eólico que existe en Guatemala esta investigación plantea realizar un estudio sobre los recursos eólicos en el municipio de Mixco, así como caracterizar el potencial del viento en la zona de influencia para desarrollar un sistema de aerogenerador eólico que suministre energía eléctrica a los pozos extractores de agua.

Introducir proyectos que utilicen aerogeneradores es esencial para el aprovechamiento del viento y pudiéndose empezar en los sistema de bombeo de agua, del cual se tendría un abastecimiento energético puntual de consumo de energía eléctrica, y por ende obteniéndose así repercusiones positivas dentro de la matriz energética, y en particular al sitio en estudio donde se realizara la investigación, que en este caso es un pozo de la municipalidad de Mixco. Entre una de las repercusiones favorables se podría mencionar es por

ejemplo: que se reduciría la dependencia de energía externa en los sistemas de bombeo y favorecería al desarrollo de la comuna.



### **3. JUSTIFICACIÓN**

La importancia de realizar esta investigación es para aprovechar los recursos de las fuentes de energías renovables y que en este caso es el viento, ya que es una generación de energía limpia y barata que puede alimentar de energía eléctrica a los motores que bombean el agua en los pozos de la comuna de Mixco. Por ende la línea de investigación va enfocada al aprovechamiento de las energías renovables con énfasis al diseño de un proyecto con energía eólica.

Debido a que existe un incremento en perforaciones de pozos y estos aumentan año tras año provocando que el consumo de energía también aumente, y generando a su vez una mayor demanda de energía a la red eléctrica, por ejemplo en el municipio de Mixco en el 2000 existía aproximadamente 70 pozos, y para el 2013 se han incrementado a aproximadamente 120 pozos, siendo un incremento de 85 % de pozos nuevos extractores de agua, implicando esto a la vez un aumento en el consumo de energía eléctrica. (Fuente Municipalidad de Mixco).

El desarrollar un proyecto con un aerogenerador eólico para un sistema de bombeo de pozos es de importancia para la reducción del consumo de energía eléctrica y reducir la generación de energía con combustible fósiles. Dado que, de ser factible este estudio para un pozo se podría aplicar para otros sistemas de bombeo en cualquier parte de Guatemala, y de esta manera se lograría reducir aún más significativamente el consumo de electricidad adquirida en la red eléctrica, implicando la reducción de gases de efecto invernadero

producidos por los generadores que operan con energías no renovables en el país.

Si en la actualidad se sumara el total de consumo de energía que tienen todos los motores de bombeo se notaría la gran cantidad de energía que se consume en la extracción de agua.

El consumo de electricidad cada año va en aumento, en el 2012 se registró un incremento de 4,2 % respecto del registrado en el 2011, y la demanda de potencia aumento en un 1,54 %, según la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE). Esto implica que la tendencia del consumo de energía eléctrica y de la demanda de potencia es de que cada año vaya en aumento, originando que cada día la matriz energética se incremente por la demanda de energía. La única forma de compensar este aumento es a través de implementación de proyectos de generación de electricidad ya sea a base de fuentes de energías renovables o fuentes de energía convencionales (petróleo, gas natural o carbón).

Por tal motivo realizar este trabajo investigativo será de gran utilidad para la reducción del consumo de energía eléctrica y las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que el modelo energético actual está caracterizado por un agotamiento de las reservas y recursos energéticos tradicionales, el desigual reparto en la producción y sobre todo en el consumo de la energía en Guatemala deteriorando de forma alarmante el medio natural y nuestro entorno más inmediato, está demostrando su especial incapacidad para armonizar progreso económico, social y sustentabilidad.

## **4. OBJETIVOS**

### **General**

Diseñar un sistema de generación de electricidad con un aerogenerador de turbina eólica para consumo asociado de energía eléctrica en un sistema de bombeo de pozos del municipio de Mixco.

### **Específicos**

1. Presentar los fundamentos de la energía eólica y determinar el aprovechamiento de los recursos eólicos generados por el viento.
2. Realizar un estudio técnico del viento en el área de influencia y mostrar los principios de funcionamiento del aerogenerador de turbina eólica.
3. Evaluar y analizar los resultados del régimen eólico en el área de estudio.
4. Diseñar un sistema de bombeo para la extracción de agua por medio de un aerogenerador de turbina eólica en el municipio de Mixco.



## **5. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIONES**

En Guatemala cada año existe un aumento en el consumo de energía eléctrica y por ende provoca que haya una mayor demanda de la misma. El consumo de energía eléctrica en el 2012 registro un incremento de 4,2 %, y la demanda de potencia aumento en 1,54 %, según la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE).

Lo anterior significa que aumente la generación de energía eléctrica en nuestro país provocada por la demanda de potencia de los consumidores. La generación de energía se puede realizar utilizando los recursos renovables ya que existe un alto potencial de ellas en Guatemala, como son las hidroeléctricas, solares, geotérmicas y eólicas.

Debido a los problemas sociales que provocan estos proyectos en las comunidades, sobre todo las hidroeléctricas, algunos de estos no se ejecutan o no se aprovechan al máximo. Actualmente los proyectos de generación se están centrando en producirse a base de carbón del cual es una fuente contaminante al medio ambiente y contribuye al aumento de gases de efecto invernadero.

Por ello como consumidores de energía, se tiene el compromiso de utilizarla responsablemente, de esta manera contribuir a mejorar el medio ambiente.

El caso en que se centra esta investigación es sobre implementación de un aerogenerador en uno de los pozos de la Municipalidad de Mixco, con el fin

de reducir el consumo de energía eléctrica suministrada por la red pública, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover el desarrollo y aprovechamiento de las energías renovables en Guatemala.

## **6. ALCANCES**

La presente investigación tiene un alcance descriptivo, debido a que el procesamiento, análisis de la información y datos recopilados establecerán el estado de la situación actual concluyendo con la propuesta que permita el desarrollo de la energía eólica en Mixco. Dado que en el alcance se pretende investigar un diseño de sistema de autoconsumo de energía eléctrica para bombeo de pozos con un aerogenerador, es necesario la elaboración de un estudio del potencial eólico de la zona que permita la correcta modelización del mismo, y de esta forma ver la factibilidad de aprovechar el recurso de la energía eólica que pueda proporcionar el viento para generar electricidad.

Dentro de los resultados esperados es importante la elección de una tecnología de generación eólica adecuada al emplazamiento, un estudio económico y de rentabilidad del aerogenerador que mejor se adapte a la zona en estudio, el diseño de las líneas de conexión del aerogenerador para la interconexión con la red pública y la elección del sistema de protecciones para los equipos eléctricos.

Al concluir la investigación se tendrá como alcance de resultados limitándose al análisis de la situación actual y establecer una propuesta estratégica para el desarrollo de la energía eólica en Guatemala, desarrollar una nueva metodología para un diseño de sistemas de bombeo de agua que se autoabastezcan de energía eléctrica con la posibilidad de inyectar la energía producida por el aerogenerador de turbina eólica a la red eléctrica pública cuando la bomba de agua no esté en funcionamiento, y al mismo tiempo se

estará aplicando los estudios adquiridos de la maestría para promover la utilización de las energías renovables para un desarrollo sostenible del país.

## **7. MARCO TEÓRICO**

### **7.1. Energía renovable**

Actualmente a nivel mundial se está impulsando la utilización de energías renovables, dado a las consecuencias que ocasionan en el medio ambiente el consumo excesivo de energías convencionales. Según la Asociación de Productores de Energía Renovables (APPA), define energía renovable como “aquellas que son obtenidas de fuentes naturales inagotables a escala humana, bien porque el recurso dispone de una cantidad de energía inmensa o bien porque el recurso tiene la capacidad de regenerarse de manera natural.” (<http://www.appa.es/01energias/02tipos.php>).

Entre las fuentes de energía renovables que se pueden mencionar se encuentran: la energía solar, la energía hidráulica, la biomasa, la generada por el viento, geotérmica etc., estas son fuentes que de una u otra manera tienen un ciclo de regeneración de su energía en forma natural y que son fuentes potenciales para usarlos como fuentes energéticas, en especial para la generación de energía eléctrica.

Según estudios desarrollados por el BID (2013), ase énfasis en su artículo “que América Latina usa más energía renovable que cualquier otra región del mundo, enfrenta retos para generar la electricidad que necesita sin perjudicar al medio ambiente.”(Sección del artículo, párrafo 5).

También destaca en otra sección del artículo que el BID está ayudando a sus países miembros sociales, económicos y ambientales en las distintas

alternativas de utilización de energías renovables. Financia proyectos que tengan el mejor impacto en relación con su desarrollo. Al mismo tiempo, el BID apoya proyectos de investigación y el desarrollo de programas piloto para comprobar la viabilidad de las mejores ideas relacionadas con las energías renovables, así como los esfuerzos del gobierno para diversificar sus matrices energéticas nacionales a través de grandes inversiones en energía eólica, el etanol eficiente y la energía hidroeléctrica (Sección del artículo del BID, párrafo 2).

## **7.2. Energía eólica**

La energía eólica es una energía producida por la velocidad del viento y del cual este depende de la actividad solar. “El sol produce un calentamiento del aire de la atmosfera, induciendo corrientes de convección vertical. La depresión que se crea, como consecuencias de estas corrientes de convección, hace que el aire de las regiones adyacentes tienda a desplazarse hacia esas depresiones, generándose el viento.” (Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, pág. 17).

Es el sol entonces la fuente principal para la generación de energía eólica. Pero también se sabe que la radiaciones solares que lo produce son irregulares, provocado esto que las distribuciones espaciales y temporales del viento sean también irregulares e intermitentes, por tanto se establece que “la aleatoriedad del viento y su dilución (contenido energético por unidad de volumen) disminuye significativamente su valor como recurso fiable de cara a la garantía del suministro de energía” (Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, pág. 17).

Por tanto la potencia que se puede obtener del viento es variado dependiendo de la altura y geografía del área donde se realice los estudios.

El ICAI (2006) en su análisis de situación y perspectivas de nuevas tecnologías energéticas describe que “la potencia obtenible es proporcional a la densidad del aire, esto quiere decir que es una magnitud aproximadamente constante a la superficie barrida por palas y al cubo de la velocidad del viento” (págs. 17-18). Por eso las regiones más favorables son las regiones con una alta velocidad del viento, el hecho de que aparezca al cubo la velocidad en la potencia del aerogenerador hace que esta sea muy sensible a las variaciones de aquella. “Como el diámetro de la pala de la hélice también contribuye como el diámetro al cuadrado, se puede concluir que las dos de las contribuciones más importantes son la velocidad del viento y el diámetro” (Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, págs. 17-18).

### **7.3. Tipos de vientos**

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

“Existe un axioma (Bjerknes) que 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”. (Fernández, pág. 17). De lo anterior se puede deducir que el desplazamiento o movimiento en sentido vertical del viento es pequeña en comparación con el movimiento que se produce en forma horizontal, por lo que se puede considerar que el viento es un

vector y que su dirección del desplazamiento horizontal se determina según la dirección geográfica de donde el viento este soplando es decir de donde viene.

“El viento sinóptico 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, (que es más fina y precisa que la circulación general de Hadley)” (Fernández, pág. 17). Cuando se hace referencia a vientos sinópticos son los grandes vientos que fluyen entre las altas y bajas presiones y muchas veces están influenciadas por la rigurosidad del terreno por donde circula, se enmarca más en un movimiento horizontal.

Sus características vienen determinadas en función de situaciones meteorológicas dadas y muy precisas, como son la configuración isobárica y posición de los frentes, teniendo en cuenta también para cualquier lugar, tanto las condiciones geográficas regionales, como las locales (relieves, cotas, etc.).

“La dirección del viento a nivel del suelo, medida generalmente a algunos metros sobre el mismo, está fuertemente influenciada por la situación topográfica del lugar considerado.” (Fernández, pág. 17)

“La frecuencia de las direcciones no es siempre una característica general en consonancia con la situación isobárica media como puede ser la posición respectiva media de los anticiclones y de las depresiones en el transcurso de los años; los vientos particulares y locales son la prueba.” (Fernández, pág. 17)

Vientos Catabáticos y Anabáticos. El viento catabático, son los vientos que descienden de las montañas y laderas es decir, el descenso de aire fresco

desde regiones elevadas o regiones más bajas, en forma de brisas, a través de laderas y valles. “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.” (Fernández, pág. 10). Ahora bien los vientos anabáticos son los vientos húmedos y cálidos que ascienden hacia las montañas condensándose estas y formando nubes. Fernández lo define como. “El viento anabático es el que presenta una componente vertical ascendente, siendo el término opuesto a catabático.”(pág. 10).

#### **7.4. Sistemas eólicos**

Un sistema eólica es un sistema que aprovecha el movimiento del viento, es decir su energía cinética para transfórmalo en otras formas útiles para el uso de la humanidad. Actualmente se está utilizando la energía eólica en muchos países para la producción de electricidad a través de aerogeneradores de turbinas eólicas.

“Un sistema conversor de energía eólica se compone de tres partes principales: (i) el rotor, que convierte la energía cinética del viento en un movimiento rotatorio en la flecha principal del sistema; (ii) un sistema de transmisión, que acopla esta potencia mecánica de rotación de acuerdo con el tipo de aplicación.” (Hector M Poggi, 2009, pág. 57). La aplicación para cada caso, es decir, si se trata de bombeo de agua el sistema se denomina aerobomba, si acciona un dispositivo mecánico se denomina aeromotor y si se trata de un generador eléctrico se denomina aerogenerador.

Dependiendo del diseño y configuración en el eje del aparato eólico estas pueden tener las siguientes características en su eficiencia de trabajo.

Relacionado al estudio de Héctor M Poggi (2009) describe que, un rotor puede ser de eje horizontal o vertical, éste recupera, como máximo teórico, el 60 % de la energía cinética del flujo de viento que lo acciona. Está formado por las aspas y la maza central en donde se fijan estas y se unen a la flecha principal; el rotor puede tener una o más aspas. Un rotor pequeño, de dos aspas, trabaja a 900 revoluciones por minuto (rpm), en tanto que uno grande, de tres aspas y 56 metros de diámetro, lo hace a 32 rpm. El rotor horizontal de tres aspas es el más usado en los aerogeneradores de potencia, para producir electricidad trifásica conectada a los sistemas eléctricos de las empresas suministradoras. (Héctor Poggi, 2009, pág. 58).

La transmisión mecánica de un aerogenerador es esencial ya que su movimiento rotatorio lo convierte en un sistema oscilante, “La transmisión puede consistir en un mecanismo para convertir el movimiento rotatorio de la flecha en un movimiento recíprocante para accionar las bombas de émbolo de las aerobombas o alimentación del generador eléctrico en aerogeneración.” (Alvaro Pinila S, 1997, pág. 30). Ahora bien este mecanismo es muy bien aprovechado en el campo dado a que se utilizan para suministrar agua a los abrevaderos del ganado o a las viviendas.

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. (Alvaro Pinila S, 1997, pág. 31)

Para equipos eólicos de mayor capacidad (varias decenas o centenas de kW de potencia eléctrica nominal), 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. (Alvaro Pinila S, 1997, pág. 31)

En la actualidad, la generación de electricidad es la aplicación más importante de este tipo de sistemas. Los aerogeneradores comerciales alcanzan desde 500 hasta 1 000 kW de potencia nominal tienen rotores de entre 40 y 60 m de diámetro y giran con velocidades que van de las 60 a las 30 rpm. “Los generadores eléctricos pueden ser asíncronos o síncronos, operando a una velocidad frecuencia constante. En el caso de aerogeneradores con potencias inferiores a los 50 kW también se utilizan generadores de imanes permanentes, que trabajan a menor velocidad angular (de entre 200 y 300 rpm)” (Hector M Poggi, 2009, pág. 58), estos no necesitan caja de engranes y que, accionándose a velocidad variable, pueden recuperar mayor energía del viento a menor costo.

Héctor M Poggi (2009) en su libro de ciencias y tecnología describe que, la potencia máxima que proporciona un aerogenerador depende fundamentalmente de dos características: la velocidad del viento y el diámetro de las hélices (o el rotor). Concretamente, la potencia es proporcional al cubo de la velocidad del viento. Así que para poseer un aerogenerador de gran potencia se necesita escoger un lugar donde los vientos sean intensos la mayor parte del año de 3 a 11 m/s (o de 11 a 40 km/h aproximadamente). (pág. 60).

Actualmente la tecnología digital para el aprovechamiento de las energías renovables ha estado avanzando y en los sistemas eólicos no ha sido la excepción, “en los aerogeneradores de potencia, el sistema de control lo

constituye un microprocesador que analiza y evalúa las condiciones de operación considerando rumbo y velocidad del viento; turbulencia y rachas; temperaturas en el generador, en la caja de transmisión y en los valeros de la flecha principal.” (Hector M Poggi, 2009, pág. 58). El microprocesador incorporado monitorea y muestrea la presión y la temperatura de los sistemas hidráulicos de los frenos mecánicos de disco en la flecha; sus rpm, así como los voltajes y corrientes de salida del generador.

El monitoreo de turbinas eólicas con microprocesadores son muy eficientes y según Héctor M Poggi en su mismo libro agrega que:

“Estos microprocesadores también detecta vibraciones indebidas en el sistema, optando por las mejores condiciones para arrancar, parar, orientar el sistema al viento y enviar señales al operador de la central eoloeléctrica sobre la operación del mismo. Con respecto a la torre que soporta al aerogenerador de eje horizontal es importante, ya que la potencia del viento es función del cubo de su velocidad y el viento sopla más fuerte entre mayor es la distancia más alto del suelo; por ello, el eje del rotor se sitúa por lo menos a 10 metros en aerogeneradores pequeños y hasta 50 o 60 metros del suelo, en las máquinas de 1 000 kW. En un aerogenerador de 500 kW son típicas las torres de 40 metros, y estas pueden ser de dos tipos: La tubular, recomendada en áreas costeras, húmedas y salinas, y la estructural o reticular, propia de regiones secas y poca contaminación atmosférica, por ser más baratas y fáciles de levantar.” (pág. 58-59).

## **7.5. 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. Es típico observar, pequeños aerogeneradores eólicos en torres entre 24 hasta 42 metros de altura. (Alvaro Pinila S, 1997, pág. 31)

## **7.6. Generador**

El generador es el elemento que convierte la energía rotacional del eje de la turbina en electricidad. 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.” (Alvaro Pinila S, 1997, pág. 33).

## **7.7. Parque eólico**

“Un parque eólico es un sistema formado por uno o varios aerogeneradores situados en el mismo emplazamiento.” ( Instituto Tecnológico de Canarias S.A., 2008). Estos parques eólicos pueden estar situados ya sea en la tierra o en el mar y su función es producir energía eléctrica aprovechando la fuerza del viento para luego inyectar la energía generada a la red de transmisión o distribución de energía eléctrica.

## **7.8. Parques eólicos interconectados**

Esto no es más que inyectar la electricidad generada por el parque eólico a la red de energía eléctrica. Si bien el propietario del parque es un productor más de electricidad, estando la compañía eléctrica obligada por ley a facilitar la conexión de los aerogeneradores a la red eléctrica y a comprar toda su producción de electricidad, con base en un sistema de precios establecidos a nivel nacional que priman la energía eólica.

## **7.9. Parques eólicos con consumos asociados (autoconsumo)**

La electricidad producida por los aerogeneradores se utiliza para el consumo propio y el excedente de electricidad, si lo hubiera, se inyecta en la red de distribución eléctrica.

## **7.10. Aerogeneradores**

Los aerogeneradores son las máquinas que se encargan de capturar la energía del viento y transformarla en energía eléctrica. A continuación se describe de forma resumida qué componentes constituyen un aerogenerador, el principio de funcionamiento del mismo y su clasificación.

## **7.11. Clasificación de los aerogeneradores eólicos**

La clasificación de los aerogeneradores se puede realizar desde varios puntos de vista, una primera aproximación al problema se puede hacer desde el punto de vista de la potencia eléctrica que pueden generar, según lo cual se una primera clasificación de aerogeneradores se basa en la posición de su eje principal.

Existen dos tipos de aerogeneradores: los de eje horizontal y los de eje vertical.

Los aerogeneradores de eje horizontal deben su nombre al hecho que poseen los ejes principales situados paralelos al suelo.

“Los aerogeneradores de eje horizontal a barlovento, llamados así porque el viento encuentra antes el rotor que la torre, tienen una mayor eficiencia que los aerogeneradores a sotavento, ya que no presentan interferencias aerodinámicas con la torre.” (ABB, 2012, pág. 13).

En cambio, tienen el inconveniente de no alinearse automáticamente con relación al viento, por lo que necesitan una aleta direccional o un sistema de orientación. “Los aerogeneradores de eje horizontal a sotavento acusan los efectos negativos de la interacción torre-rotor, pero se alinean automáticamente y pueden utilizar un rotor flexible para resistir los vientos fuertes.” (ABB, 2012, pág. 13).

El aerogenerador de eje horizontal de tres palas es el modelo más generalizado, aunque existen modelos de dos palas de una sola pala dotada de contrapeso que ya no se usan en la actualidad y multipalas, usado sobre todo en microeólica.

Según el libro técnico de ABB (2012) demuestra que la velocidad de rotación disminuye al crecer el número de palas (mientras que el par aumenta), los rotores de 2 palas giran más rápidamente que los de 3 (40 rpm de media frente a 30 rpm de los tripala), de manera que el ruido aerodinámico es mayor. Además, un rotor de dos palas está sometido a desequilibrios debidos a la variación del viento con la altura; a efectos giroscópicos esto sucede cuando la

góndola se orienta tiene un momento de inercia inferior cuando las palas están en posición vertical que cuando están horizontales. Para solucionar este problema generalmente incorporan un buje basculante que les permite equilibrar el empuje asimétrico en el rotor. (pág. 13)

En cualquier caso, el rotor de dos palas es más liviano, por lo que todas las estructuras de soporte pueden ser menos masivas, con la consiguiente reducción de costes.

En lo que respecta a los aerogeneradores de eje vertical estos están en forma perpendicular al suelo y pueden captar el viento de cualquier dirección.

“Son aerogeneradores de eje vertical y de sustentación, ya que las superficies expuestas al viento presentan un perfil de ala capaz de generar una distribución de la presión a lo largo de la pala y, por tanto, un par en el eje de rotación.” (ABB, 2012, pág. 12).

Estos aerogeneradores de eje vertical no necesitan de un control de orientación, estos son de mayor sencillez y sus multiplicadores y generadores se realizan en el suelo lo que supone una reducción de costes en el montaje.

## **7.12. Clasificación de los aerogeneradores de acuerdo a su potencia**

Los aerogeneradores también se pueden clasificar de acuerdo a su potencia nominal. Se pueden mencionar los siguientes modelos: microturbinas, pequeños aerogeneradores, grandes aerogeneradores y aerogeneradores multimegavat.

### **7.12.1. Microturbinas (< 3 kW)**

Estos aerogeneradores son usados por pequeños consumidores de energía, como por ejemplo; viviendas aisladas o sistemas aislados de telecomunicaciones etc., generalmente producen electricidad para cargar baterías de almacenamiento.

“Este posee un generador eléctrico que es de imanes permanentes y se acciona directamente por la turbina eólica sin que haya caja multiplicadora de velocidad entre el eje del rotor del aerogenerador y el generador eléctrico.” (Villarubia, 2004, pág. 13).

Estas son eólicas rápidas de eje horizontal comúnmente de tres palas con pequeños diámetros (entre 1 a 5 metros) que trabajan a velocidad de rotación elevada y generalmente variable. La electricidad producida en forma de corriente alterna de frecuencia variable es rectificada y almacenada en las baterías para posteriormente ser convertida de nuevo de corriente continua a alterna y a frecuencia constante.

“A este tipo de microturbinas pertenecen las eólicas lentas de eje horizontal con multipalas, cuya curva característica par velocidad es adecuada para el accionamiento directo de bombas hidráulicas para la extracción de agua de pozos.” (Villarubia, 2004, pág. 13).

### **7.12.2. Pequeños aerogeneradores (< 50 kW)**

Este rango de aerogeneradores cubre el mismo tipo de demanda de los anteriores, pero con mayor potencia. Estos tienen su aplicación en pequeños parques eólicos, centros comerciales, universidades y hospitales. Además se

emplean en sistemas híbridos para abastecer núcleos de población aislados. Estos sistemas combinan la energía eólica con algún otro tipo, por ejemplo generadores diesel, solar fotovoltaica o la propia red eléctrica que facilita la energía de apoyo.

El rango de 2 a 10 kW, el sistema de accionamiento y el tipo de generador eléctrico suelen ser igual que en el caso anterior. A partir de la gama de alta potencia, en estas se introducen cajas de engranaje entre el eje del rotor y del generador eléctrico para amplificar la velocidad del rotor. El generador eléctrico es síncrono o asíncrono, pero funcionando con una velocidad mucho mayor que la del rotor de una turbina. En estas condiciones los aerogeneradores suelen trabajar en régimen de velocidad de rotación constante. (Villarubia, 2004, pág. 14).

### **7.12.3. Grandes aerogeneradores (< 850 kW)**

En tipos de aerogeneradores ya su función es la de producción de electricidad para su inyección a la red eléctrica. Estos son aerogeneradores rápidos y de eje horizontal y regularmente con rotor trípala. La mayoría de ellos están comprendidos en un rango de potencia nominal entre 200 y 850 kW, con diámetros entre 25 y 55 m. Generalmente este rotor gira a una velocidad constante (entre 15 y 50 rpm), y la velocidad de la punta de la pala no supera los 65 a 70 m/s para limitar la emisión de ruido y la acción de la fuerza centrífuga. Estas llevan una caja de engranajes para amplificar la velocidad y accionar el generador eléctrico. (Villarubia, 2004, págs. 14-15).

Las palas del rotor van previstas de algún sistema de regulación, mediante el que se controla la potencia del rotor en función de la velocidad del viento.

#### **7.12.4. Aerogeneradores multimegavat (1 y 3 MW)**

Estos poseen diámetros en el rango de unos 50 a 90 m y altura de buje (centro de giro del rotor) entre 60 y 100m, son grandes máquinas que han iniciado su introducción comercial hacia 200 y en particular en instalaciones marinas. Estos presentan el factor favorable de la economía a escala. (Villarubia, 2004, pág. 15).

#### **7.13. Funcionamiento de un aerogenerador**

Un aerogenerador o turbina eólica transforma la energía cinética del viento en energía eléctrica sin usar combustible, pasando por el estadio intermedio de conversión a energía mecánica de rotación a través de las palas. Los aerogeneradores pueden ser de sustentación o de resistencia en función de cuál de las fuerzas generadas por el viento se use como fuerza motriz.

Para entender el principio de funcionamiento de un aerogenerador se hace referencia a las turbinas de uso más extendido en la actualidad, es decir, las de sustentación; en ellas, a diferencia de las de resistencia, el viento circula por ambas caras de la pala, las cuales tienen perfiles geométricos distintos, creando de esta forma un área de depresión en la cara superior respecto a la presión en la cara inferior. (ABB, 2012, pág. 10)

Siempre este autor compara esta diferencia de presiones que produce una fuerza llamada sustentación aerodinámica sobre la superficie de la pala, de forma parecida a lo que sucede en las alas de los aviones. La sustentación en las alas de un avión es capaz de levantarlo del suelo y mantenerlo volando, mientras que en un aerogenerador, dado que las palas son solidarias con el terreno, provoca su rotación alrededor del eje del buje.

Dice que al mismo tiempo se genera una fuerza de resistencia que se opone al movimiento y es perpendicular a la sustentación. En los aerogeneradores diseñados correctamente, la relación sustentación/resistencia es grande dentro del rango normal de operación. (pág. 10).

Por lo tanto un aerogenerador necesita una velocidad del viento mínima (velocidad de acoplamiento o cut-in) de 3 - 5 m/s y entrega la potencia nominal a una velocidad de 12 - 14 m/s. Pero por razones de seguridad, a velocidades elevadas por lo general superiores a 25 m/s (velocidad de desconexión o *cut-off*), el sistema de frenado para la turbina. El bloqueo puede efectuarse por medio de frenos mecánicos que detienen el rotor o, en el caso de palas de inclinación variable, escondiéndolas del viento al ponerlas en la posición conocida como bandera. (ABB, 2012, pág. 10).

#### **7.14. Selección del emplazamiento**

Para seleccionar el área geográfica que cumpla con las condiciones para la instalación de un aerogenerador o un parque eólico debe de considerarse varios factores entre los cuales Wyngard en su libro de energía eólica describe a continuación.

Una actividad inicial central del proyecto es la selección de las áreas geográficas de interés para la implantación de la central, esta selección debe considerar el análisis de los siguientes aspectos: intensidad y estacionalidad del viento, orografía y topografía de las localidades, sismicidad y calidad de los suelos de fundación, disponibilidad de terrenos, plan regulador, estrictiones municipales, factibilidad de cambio de uso de suelos, accesos, entorno local, conflicto con terceros (agricultores, comunidades, turismo, etc.), ubicación y distancia al sistema de distribución, subtransmisión o transmisión troncal,

facilidades para la construcción (energía de faenas, agua potable e industrial), e impacto medio ambiental. (Wynyard, 2007, págs. 90-91).

Siempre el mismo autor señala que se debe generar información estadística de base para las áreas anteriores. Con este fin se deben instalar torres de medición para evaluar la real factibilidad. Los procesos de medición se deben realizar por un periodo mínimo de un año, dependiendo del tamaño de la central a proyectar.

Para determinar la potencia a instalar, se deben evaluar las condiciones de producción de electricidad de la generadora, a través de un estudio de análisis de la energía generable por la central según las características del viento en la zona y la revisión de criterios de asignación de potencia firme para estimar el impacto que la central pueda tener en su inserción en el sistema eléctrico y en la demanda propia de la zona de concesión de la distribuidora. (Wynyard, 2007, págs. 90-91)

#### **7.15. Bombeo de agua utilizando turbinas eólicas**

Un sistema de bombeo es un conjunto de elementos transformadores de energía, requiere de energía mecánica que puede ser aportada por un motor eléctrico, turbina (térmica o hidráulica para grandes caudales), aeromotor, etc., y transfiere parte de la energía recibida a un fluido (agua, gasolina, etc.) en forma de presión, de posición o de velocidad. (Ruiz O, 2002, pág. 13).

Tanto el bombeo de agua para aplicaciones de consumo y riego mediante aeromotores de baja potencia, como el bombeo a gran escala, se adaptan perfectamente a la irregularidad en el suministro de energía que caracteriza a los sistemas eólicos. Por otra parte el comportamiento hidrodinámico de los

elementos constitutivos del sistema de bombeo, pueden cumplir las funciones de regulación del aeromotor, impidiendo que se produzcan velocidades excesivas del rotor.

Esta ventaja permite la utilización de máquinas más sencillas e incluso de sistemas eólicos que funcionen a velocidades de giro variables, con lo que se mejora el aprovechamiento energético del viento. La potencia absorbida en un sistema de bombeo depende de la cantidad de agua a bombear, de la altura piezométrica a la que hay que elevar el agua y de las pérdidas de presión por rozamiento en el interior de las tuberías. (Ruiz O, 2002, pág. 13).

Cuando aumenta la velocidad del viento y se incrementa la potencia generada por el aeromotor, aumenta la presión de la bomba y el agua circula a mayor velocidad, incrementándose las pérdidas por rozamiento en el interior de las tuberías. La potencia absorbida por la instalación crecerá en función de estas pérdidas actuando como un freno hidrodinámico que evitará aceleraciones excesivas en el aeromotor. (Ruiz O, 2002, pág. 13).

#### **7.16. Tipos de turbinas eólicas para bombeo de agua**

Las turbinas eólicas para bombeo de agua deben cumplir con ciertas características propias de los sistemas de bombeo de agua, entre otras un torque relativamente alto para vencer la inercia producida por el peso de la columna de agua, además que deben girar a bajas revoluciones si el acople es directo, en caso contrario hay que colocar una caja de transmisión para reducir las rpm. Su funcionamiento debe adaptarse a velocidades bajas de viento, para tener un rango más generalizado de aplicación del sistema de bombeo. (Ruiz O, 2002, pág. 14).

Entre las turbinas eólicas que cumplen estas características son: a) una de eje horizontal como lo es la multipalas una de eje vertical, como savonius. La primera es más eficiente y en este trabajo se realizó una evaluación experimental. La segunda es de muy fácil construcción, requiere de materiales económicos, pero no se cuentan con suficiente información confiable sobre su eficiencia para realizar una selección de este tipo de aeromotor, en las condiciones del caso concreto estudiado. (Ruiz O, 2002, pág. 14).

#### **7.17. Tipos de bombas utilizadas para bombeo de agua**

Existe una gran variedad en el mercado de equipos de bombeo, algunos de los cuales por sus requerimientos de diseño no pueden adaptarse a un sistema conversor de energía eólica, por lo tanto a continuación se nombran algunos tipos de bombas y sus características generales:

Bomba de pistón. El sistema de pistón es el que se viene utilizando desde hace más tiempo por ser el más adecuado en aeroturbinas de rotor lento del tipo multipala o Savonius. La ventaja de la bomba de pistón es que funciona con velocidades bajas lo que permite acoplarlas a la turbina mediante un multiplicador de velocidad o incluso directamente. (Ruiz O, 2002, pág. 15).

El sistema clásico de pistón lleva acoplado a la turbina una biela, una excéntrica o una caja reductora que mueven el eje del pistón. Un problema típico de las bombas de pistón es que requieren un elevado par motor para el arranque precisamente en el momento en que la turbina funciona a bajo rendimiento al no haber alcanzado la velocidad de régimen. Este inconveniente es menos grave en los aeromotores lentos que presentan un elevado par de arranque pero en los aeromotores rápidos obliga a disponer de mecanismos especiales como un motor de arranque auxiliar o un embrague centrífugo para

que el acoplamiento al eje motor se produzca cuando se ha alcanzado cierta velocidad. (Ruiz O, 2002, pág. 15).

Bombas de tornillo helicoidal. Las bombas helicoidales funcionan a velocidades de giro de 100 - 1 000 rpm, con lo que son muy adaptables a turbinas eólicas rápidas con acoplamiento directo. Son de constitución muy robusta y operan con buenos rendimientos del orden del 75 % al 80 % para alturas piezométrica de 30 m. Aunque no requieren un par de arranque muy elevado suelen disponer de un embrague centrífugo o de una válvula que vacía el cilindro antes de ponerse en marcha. (Ruiz O, 2002, pág. 15).

Bombas centrífugas. “Las bombas centrífugas son más adecuadas para adaptarlas a los modernos aerogeneradores rápidos, pues funcionan con velocidades de giro superiores a las bombas de pistón y con menor par de arranque.” (Ruiz O, 2002, pág. 15).

#### **7.18. Bombeo y compresión de aire**

“El bombeo de aire es otra posible forma de utilización de las turbinas eólicas de características parecidas al bombeo de agua. En este caso la potencia mecánica se manifiesta en la impulsión del fluido o en su compresión” (Ruiz O, 2002, pág. 16).

Esta variante permite ampliar el campo de las aplicaciones de la energía eólica y reúne muy buenas características para su almacenamiento. Las instalaciones de aire son más sencillas y menos costosas que las de agua y requieren menos mantenimiento ya que no tienen problemas de corrosión.

La menor densidad y viscosidad del aire respecto al agua reduce considerablemente las pérdidas de presión por rozamiento en conductos y tuberías aunque esta ventaja se compensa con el inferior rendimiento de los compresores y ventiladores. (Ruiz O, 2002, pág. 16).

### **7.19. Bombas de diafragma**

Las bombas de diafragma desplazan el agua por medio de caucho reforzado con materiales sintéticos. En la actualidad, estos materiales son muy resistentes y pueden durar de dos a tres años de funcionamiento continuo antes de requerir reemplazo, dependiendo de la calidad del agua. Las bombas de diafragma son económicas. Cuando se instala una bomba de este tipo siempre se debe considerar el gasto que representa el reemplazo de los diafragmas una vez cada dos o tres años. Las bombas a diafragma tienen su atractivo en sus excelentes rendimientos y su gran versatilidad de uso. Al ser aptas para todo tipo de trabajos donde se requieran cubrir pequeños y medianos caudales con alturas medias o pequeñas; pero con gran confiabilidad. Las mismas han sido expresamente diseñadas para la utilización en ambientes industriales, agrícolas y doméstico. (Ruiz O, 2002, pág. 16).

### **7.20. Bombas de engranes**

Son bombas rotatorias en las cuales hay dos o más engranes para efectuar la acción de bombeo. Es característico que uno de los engranes sea capaz de conducir a los otros. Los contactos mecánicos entre los engranes forman una parte del sello fluido en movimiento entre los orificios de entrada y salida y las puntas exteriores radiales de los engranes y los lados de los engranes, se mueve a lo largo de las superficies de los dientes y después brinca en forma discontinuada de diente en diente a medida que el engrane

gira. (Estas dos características distinguen a las bombas de engranes, de las bombas de lóbulo, en las cuales los rotores no son capaces de mover el uno al otro y en las cuales el lugar geométrico del contacto del sello fluido entre los lóbulos se mueve continuamente a través de todas las superficies radiales de los lóbulos). (Ruiz O, 2002, págs. 16-17).

### **7.21. Sistemas aislados**

Al hablar de sistemas aislados es necesario mencionar aquellas aplicaciones las que las energías renovables se emplean directamente, tal es el caso de las aplicaciones solares para el calentamiento de agua, los sistemas eólicos de bombeo (molino americano), la producción de agua caliente mediante aguas termales. Estas aplicaciones representan los primeros aprovechamientos de energía renovables que aparecen en la historia. (González, 2001, págs. 27-28).

En cuanto a la producción de electricidad se refiere, la opción más empleada en los sistemas aislados es la del abastecimiento mediante grupos diésel, no obstante, ya sea por motivos económicos o ecológicos, cada vez más se intenta incluir a las energías renovables en la generación, bien complementado al grupo diesel o sustituyéndolo completamente. De esta forma aparecen configuraciones de sistemas aislados que combinan varias fuentes de energía, son los denominados sistemas híbridos. Los sistemas híbridos nacen de la necesidad de compensar el comportamiento imprevisible ya sea del sol, del viento o de otra renovable (González, 2001, págs. 27-28).

Mediante la combinación de varias fuentes de energía se puede asegurar una mantenibilidad en el suministro eléctrico, aparte de explotar de forma más adecuada los recursos del entorno.

#### Parques eólicos aislados

“Son aquellos que no tienen conexión alguna con la red eléctrica y cuya finalidad del aerogenerador o parque eólico es abastecer energéticamente un consumo puntual”. (Instituto Tecnológico de Canarias S. A., 2008, pág. 88).



## 8. ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS

ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. ENERGÍA EÓLICA
  - 1.1. Antecedentes
  - 1.2. Energía eólica en el mundo
  - 1.3. Energía eólica en Centroamérica
  
2. APROVECHAMIENTO DEL RECURSO EÓLICO
  - 2.1. Los tipos de vientos
    - 2.1.1. Vientos catabáticos
    - 2.1.2. Vientos anabáticos
    - 2.1.3. Velocidad del viento
  - 2.2. Fundamento aerodinámico de las máquinas eólicas
    - 2.2.1. Fuerzas sobre un perfil
    - 2.2.2. Potencia útil y rendimiento
  - 2.3. Cargas regulación y orientación de un aerogenerador
  - 2.4. El parque eólico

- 2.5. Componentes de los equipos de conversión de energía eólica
  
- 3. ESTUDIO TÉCNICO DEL VIENTO EN EL ÁREA DE INFLUENCIA
  - 3.1. Obtención de datos y estación meteorológica
  - 3.2. Métodos utilizados para medir la velocidad del viento
  - 3.3. Cálculo de la potencia del viento
  - 3.4. Registro de datos obtenidos
  - 3.5. Tratamiento estadístico de los datos
  - 3.6. Informe para evaluar el recurso de la energía eólica
  
- 4. EL AEROGENERADOR
  - 4.1. Funcionamiento del aerogenerador
  - 4.2. Descripción técnica del aerogenerador
    - 4.2.1. Tipo de turbina
    - 4.2.2. Rotor
    - 4.2.3. Sistema de transmisión y generador
    - 4.2.4. Sistema de freno
    - 4.2.5. Sistema de orientación
    - 4.2.6. Góndola
    - 4.2.7. Torre
    - 4.2.8. Peso del aerogenerador
    - 4.2.9. Unidad de control y potencia
    - 4.2.10. Elementos eléctricos en la góndola
  
- 5. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL RÉGIMEN EÓLICO EN EL ÁREA DE ESTUDIO
  - 5.1. Caracterización de tipos de terreno para instalación de un sistema eólico
  - 5.2. Orografía

- 5.3. Rugosidad y perfil del viento
  - 5.4. Altura de montaje
  - 5.5. Emplazamiento
6. DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO PARA LA EXTRACCIÓN DE AGUA CON AEROGENERADOR DE TURBINA EÓLICA EN EL MUNICIPIO DE MIXCO
- 6.1. Esquema del sistema de bombeo
    - 6.1.1. Diseño del tipo de bombeo
    - 6.1.2. Tipo de motor eléctrico
    - 6.1.3. Cálculo de gasto de bombeo
  - 6.2. Dimensionamiento del aerogenerador propuesto
  - 6.3. Sistema interconectado a la red eléctrica pública
    - 6.3.1. Sistema aislado
    - 6.3.2. Sistema para conexión a red
  - 6.4. Análisis económico
  - 6.5. Impacto ambiental

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS



## 9. METODOLOGÍA

### 9.1. Descripción de la investigación

El trabajo investigativo a desarrollarse se enfoca a una investigación de diseño no experimental cuantitativa. Entre las variables que se tomarán en cuenta están: la velocidad del viento, la densidad y temperatura, dado a que estas son las variables que determinan el potencial eólico para la producción de energía eléctrica que el viento pueda suministrar a un aerogenerador de turbina eólica y este a la vez produzca electricidad.

Con la finalidad de alcanzar los objetivos planteados en la presente investigación, se describen las herramientas que se consideran relevantes para el análisis, diagnóstico y propuesta para el desarrollo de la instalación de un aerogenerador de turbina eólica en el municipio de Mixco.

Para el diseño de la investigación se indagará a través de los procesos de recolección de información del viento *in situ* directamente, y de fuentes primarias y secundarias, donde la información obtenida sobre el viento determinará la viabilidad de generar energía eléctrica con un aerogenerador eólico.

La metodología para desarrollar la investigación del sistema de generación de electricidad por medio de un aerogenerador de turbina eólica para la alimentación de un sistema de bombeo de pozos dentro del municipio de Mixco y la asociación al sistema de distribución de energía eléctrica se describe a continuación.

- Primera fase

- Permisos e inspección de área en estudio

En la primera fase de la investigación se solicitará a la Municipalidad de Mixco los permisos y autorizaciones respectivas para la investigación de campo, se solicitará información a la Municipalidad de Mixco sobre el consumo de energía que poseen los pozos así como las características técnicas del sistema. Se efectuarán dos visitas al sitio en estudio, para obtener un diagnóstico general del sistema de bombeo, se verificará el terreno donde está ubicado el pozo.

- Segunda fase

- Mediciones de potencial eólico en campo

En esta segunda fase se medirán datos de velocidad del viento y temperatura ambiente, utilizando para ello un anemómetro para las mediciones respectivas de campo. Este anemómetro será ubicado en una torre o mástil a una altura mínima de 10 metros, dicho instrumento se montará sobre la cima o sobre un brazo de la torre, esto es para evitar la influencia o perturbaciones que pueda causar la torre a las lecturas de viento en el anemómetro y dar información errónea en sus mediciones. Además se evitará instalar la torre en cercanías de cables, alambres, postes, abrazaderas etc., para evitar también las perturbaciones que puedan causar estas hacia el anemómetro.

La adquisición de los datos serán tomados en lapsos de 10 minutos cada medición, para luego promediar los datos y obtener un dato de velocidad

promedio por hora. Los datos serán obtenidos en un lapso de 8 horas por día, en horas alternadas cada día y en un periodo de 8 días.

- Tercera fase
  - Recopilación y análisis de la información

En la tercera fase se recopilará y analizará la base de datos obtenidos en las mediciones de campo, para luego verificar la validación de los datos correctos y rechazar los datos que se hayan tomado por algunos errores o causas fuera del alcance humano, como por ejemplo, fenómenos físicos extraordinarios como pueden ser turbulencias excesivas y altas velocidades de vientos o rangos incorrectos de especificaciones del instrumento de medición etc.

También se consultará registros meteorológicos en el INSIVUMEH, para obtener datos del patrón de vientos generados en los últimos dos años. Con estos datos obtenidos se hará un análisis de intensidad y estacionalidad del viento, para luego evaluar la producción de electricidad que se pueda generar según las características del viento en la zona.

- Cuarta fase
  - Determinación del aerogenerador eólico para la producción de energía eléctrica

Una vez procesada toda la información obtenida en los estudios de mediciones y acorde a los resultados sobre el potencial eólica del lugar, se procederá a analizar el aerogenerador que mejor se adapte para generación de

electricidad, apoyado con material bibliográfico de nuevas tecnologías que se están desarrollando. Se evaluará la información técnica del motor de la bomba y todas las características eléctricas que conlleva, se procederá a evaluar las mejores condiciones que se acople al proyecto según datos y cálculos recabados. Al tener los resultados del cálculo, se procederá a investigar las mejores alternativas en aerogeneradores según tecnología y según los resultados obtenidos. Se realizará un análisis económico para determinar la viabilidad del proyecto.

- Quinta fase
  - Viabilidad de conexión del sistema eólico a la red de distribución eléctrica

Se realizará un diseño de circuito eléctrico para la instalación de un contador bidireccional donde monitoreará la energía en kW/h producidos por el aerogenerador, en tanto que el excedente generado en determinado momento inyectarlo a la red. Se investigará sobre los procedimientos, requisitos técnicos y reglamentos necesarios para la conexión y operación de los medios de generación a pequeña escala, y conectados a la red de distribución, establecidos por la ley general de electricidad de Guatemala.

- Sexta fase
  - Impacto al medio ambiente por la instalación del aerogenerador

En esta fase se realizará un estudio de impacto ambiental para determinar los posibles efectos negativos que pueda ocasionar la instalación de un

aerogenerador en el entorno, el efecto negativo puede ser por el ruido hacia el vecindario cercano, el impacto visual, la flora y la fauna avícola.

- Séptima fase
  - Informe de resultados

En la séptima fase se realizará un informe de todos los resultados obtenidos durante el proceso de investigación del proyecto. Recopilación de todos los datos, elaborar estudio y análisis de la información obtenida, para luego entregar el estudio final de la investigación realizada en la Municipalidad de Mixco. Se estructurará el informe final con los resultados que se obtuvieron durante el estudio de la investigación y presentarlo a la escuela de posgrado.



## 10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Se realizará a través de recolección de información completa en la zona donde se encuentra ubicado el sistema de bombeo a estudiar.

Se solicitará datos a la estación meteorológica del INSIVUMEH.

Se realizará mediciones en la zona de estudio para determinar el promedio de la velocidad del viento, se analizará los hechos desarrollados en el evento para determinar la viabilidad del proyecto eólico.

Al obtener los datos del INSIVUMEH y las mediciones realizadas en el área, se procederá a realizar un tratamiento estadístico descriptivo de los datos obtenidos del viento, para luego disponer de estos a través de un histograma de frecuencias y poder modelar la duración porcentual de las diversas velocidades del viento, tomada durante un periodo determinado (por ejemplo un año), y a partir de este se pueda obtener un histograma estadístico de frecuencias de la velocidad del viento.

Para la distribución temporal de la velocidad del viento del lugar específico se utilizará la función estadística llamada Weibull, dado a que es la que más se ajusta a las frecuencias de distribución de velocidades medias del viento dentro de un histograma.

La distribución de Weibull es la que más se ajusta para modelar la distribución de las velocidades de viento en el lugar de estudio. Para ello se obtendrá los parámetros estadísticos donde pueda obtenerse histogramas de

frecuencias del viento, funciones de densidad de la distribución del viento, etc., para luego obtener la velocidad media del viento y poder determinar la viabilidad sobre el emplazamiento en estudio.





## 12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Para realizar este trabajo de investigación la disponibilidad de los recursos económicos son necesarios, y para llevar a cabo los objetivos y metas señaladas en esta investigación, se contará con los recursos financieros del estudiante. Entre los gastos se estipula el tiempo de estudio, costo de tiempo de desarrollo, y costo de recurso humano que participe durante la ejecución de la investigación.

Tabla I. Presupuesto

<b>Actividad</b>	<b>Costo en Quetzales</b>
<b>Personal técnico.</b>	Q 700,00
<b>Asesoría</b>	Q 2 000,00
<b>Materiales insumos, equipos de medición y servicios técnicos para el desarrollo de la investigación.</b>	Q 7 000,00
<b>transporte</b>	Q 500,00
<b>Material bibliográfico</b>	Q 1 000,00
<b>Otros (papel, impresión materiales varios, etc.)</b>	Q 400,00
<b>Total</b>	Q 11 600,00

Fuente: elaboración propia.

Con respecto a la factibilidad técnica, se solicitará asesoría con expertos que tengan experiencia, habilidad y conocimiento en el tema, documentación

bibliográfica de proyecto de energía eólica que puedan ser necesarios para efectuar la actividad que requiera la investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ABB. (2012). [www05.abb.com/](http://www05.abb.com/). Recuperado el 23 de 10 de 2013, de [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/ac764cb1be081128c1257a30003c70d7/\\$file/Cuaderno%20Tecnico\\_num%2012\\_Plantas%20eolicas.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/ac764cb1be081128c1257a30003c70d7/$file/Cuaderno%20Tecnico_num%2012_Plantas%20eolicas.pdf)
2. Alvarez, C. (2006). Energía Eólica. Madrid España.: Instituto para la Diversificación y ahorro de la energía.
3. Alvaro Pinila S, P. (1997). Manual de Aplicación de Energía Eólica. Colombia.
4. Asociación de Productores de Energía Renovable . (s.f.). <http://www.appa.es/>. Recuperado el 28 de 02 de 2014, de <http://www.appa.es/01energias/02tipos.php>
5. Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI. Generación eléctrica con energía eólica presente y futuro. España: Asociación Nacional de Ingenieros del ICA.
6. Banco Interamericano de Desarrollo. (18 de 06 de 2013). <http://www.iadb.org/>. Recuperado el 19 de 10 de 2013, de <http://www.iadb.org/es/temas/energia/energias-renovables,2653.html#.UmSQXPIFV48>

7. BID. (18 de 6 de 2013). <http://www.iadb.org>. Obtenido de <http://www.iadb.org/es/noticias/articulos/2013-06-18/energia-renovable-de-america-latina-y-el-caribe,10486.html>
8. Cabrea, A. M. (2011). Diseño de un sistema de bombeo solar eolico para consumo de agua en cabañas ecoturísticas en la Pitaya, Veracruz México. Mexico: Universidad Internacional de Andalucía.
9. Cabrea, Ana María Cerdán. (12 de 2010). <http://dspace.unia.es/>. Recuperado el 8 de 1 de 2014, de [http://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/1468/0211\\_Cerdan.pdf;jsessionid=0515DC27AA276679A0043843BBE87924?sequence=1](http://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/1468/0211_Cerdan.pdf;jsessionid=0515DC27AA276679A0043843BBE87924?sequence=1)
10. CNEE. (2012). <http://www.cnee.gob.gt/>. Recuperado el 17 de 10 de 2013, de <http://www.cnee.gob.gt/xhtml/memo/Informe%20estadistico%202012.pdf>
11. Confederación e Organizaciones Empresariales de Castilla y León . Las Energías Renovables, Solar y Eólicas. España: Junta de Castilla y León.
12. Coordinación de Energías Renovables. (2008). Energía Eólica. Argentina: Tecnología de la Información.
13. Energy research Centre of the Netherlands. (20 de 09 de 2009). <http://planeolico.iie.org>. Recuperado el 19 de 10 de 2013, de <http://planeolico.iie.org.mx/5tocol/8%20Hsnel%20IIE.pps1>
14. Fernández, D. P. Energía Eólica. Cantabria.: Universidad de Cantabria.

15. González, C. J. (8 de 11 de 2001). Análisis y simulación de sistemas eólicos aislados. Vigo, España: Universidad de Vigo.
16. Hector M Poggi, A. m. (2009). Tecnología Solar Eólica-Hidrogeno-Pilas de combustible como fuentes de energía. Mexico: Mexico.
17. Instituto Tecnológico de Canarias S.A-. (2008). Energías Renovables y Eficiencia Energética. España.
18. Jaime Moragues, A. R. (2003). Energía Eolica. Argentina.
19. José Aixalá, J. S. (2003). La energía eólica en Aragón. Impacato Socioeconomico. España: Universidad de Zaragoza.
20. Manuel leal Rubio, A. D. Diseño de Aerogeneradores.
21. Ministerio de Energía de Chile. (s.f.). <http://antiguo.minenergia.cl/>. Recuperado el 14 de 12 de 2013, de [http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/03\\_Energias/Otros\\_Niveles/renovables\\_noconvencionales/Tipos\\_Energia/eolica.html](http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/03_Energias/Otros_Niveles/renovables_noconvencionales/Tipos_Energia/eolica.html)
22. Ministerio de Energía de Chile. (s.f.). [www.minenergia.cl/](http://www.minenergia.cl/). Recuperado el 15 de 12 de 2013, de [http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/03\\_Energias/Otros\\_Niveles/renovables\\_noconvencionales/Tipos\\_Energia/eolica.html](http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/03_Energias/Otros_Niveles/renovables_noconvencionales/Tipos_Energia/eolica.html)
23. Ministerio de Energía y Minas. (s.f.). [www.mem.gob.gt](http://www.mem.gob.gt/). Recuperado el 19 de 10 de 2013, de <http://www.mem.gob.gt/wp->

content/uploads/2012/04/1.\_Resumen\_Mediciones\_del\_Viento\_en\_Guatemala.pdf

24. Pinilla, A. (07 de 1997). Manual de Aplicación de la energía eólica. Manual de Aplicación de la energía eólica . Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas.
25. Ruiz O, L. J. (2002). Diseño de un grupo eólico para bombeo de agua. Caracas Venezuela.
26. Santos, L. M. (06 de 2006). <http://www.iit.upcomillas.es/>. Recuperado el 18 de 12 de 2013, de <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/44a03b2140c78.pdf>
27. SWERA. (14 de 11 de 2005). SWERA informe nacional. Recuperado el 23 de 10 de 2013, de [openei.org: en.openei.org/datasets/files/730/pub/borrador\\_209.pdf](http://openei.org/en/openei.org/datasets/files/730/pub/borrador_209.pdf)
28. Unidad de Planeación Minero Energética, UPME. (2003). Guía para la utilización de la energía eólica para bombeo de agua. Bogotá Colombia.
29. UPME. (2 de 2003). <http://www.si3ea.gov.co/>. Recuperado el 8 de 01 de 2014, de [http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/energias\\_alternativas/normalizacion/GUIA\\_PARA\\_LA\\_UTILIZACION\\_DE\\_LA\\_ENERGIA\\_EOLICA\\_PARA\\_BOMBEO\\_DE.pdf](http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/energias_alternativas/normalizacion/GUIA_PARA_LA_UTILIZACION_DE_LA_ENERGIA_EOLICA_PARA_BOMBEO_DE.pdf)
30. Villarubia, M. (2004). Energía Eólica. Barcelona, España: Aleph, servicios editoriales.

31. World Wind Energy Association . (04 de 2011). [www.wwindea.org](http://www.wwindea.org). Recuperado el 19 de 10 de 2013, de [http://www.wwindea.org/home/images/stories/pdfs/worldwindenergyreport2010\\_e.pdf](http://www.wwindea.org/home/images/stories/pdfs/worldwindenergyreport2010_e.pdf)
  
32. Wyngard, H. R. (2007). Energía Eólica, La Generación Eólica. Chile: Universidad Católica de Chile.

