



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL  
EÓLICO Y SU APROVECHAMIENTO EN EL MUNICIPIO DE PALÍN,  
ESCUINTLA**

**Daniel Eduardo Arévalo Yancos**

Asesorado por la MSc. Inga. Rocío Elizabeth Reyna Rodríguez

Guatemala, octubre de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL  
EÓLICO Y SU APROVECHAMIENTO EN EL MUNICIPIO DE PALÍN,  
ESCUINTLA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**DANIEL EDUARDO ARÉVALO YANCOS**

ASESORADO POR LA MSC. INGA. ROCÍO ELIZABETH REYNA RODRÍGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma Ramos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **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 PARA LA DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO Y SU APROVECHAMIENTO EN EL MUNICIPIO DE PALÍN, ESCUINTLA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 30 de enero de 2016.

**Daniel Eduardo Arévalo Yancos**



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

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



ADSE-MEAPP-0002-2016

Guatemala, 30 de enero de 2016.

Director:  
Ing. Carlos Salvador Wong Davi  
Escuela de Ingeniería Química  
Presente.

Estimado Director:

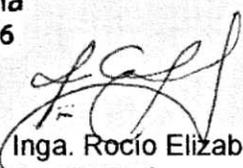
Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Daniel Eduardo Arévalo Yancos** con carné número **2003-12665**, quien opto la 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.

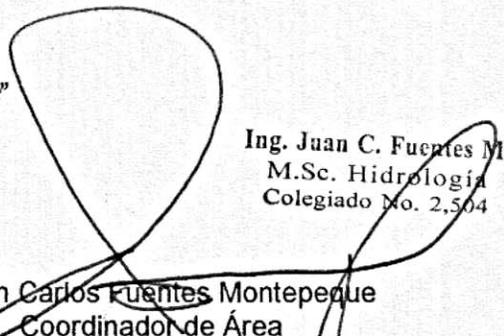
Sin otro particular, atentamente,

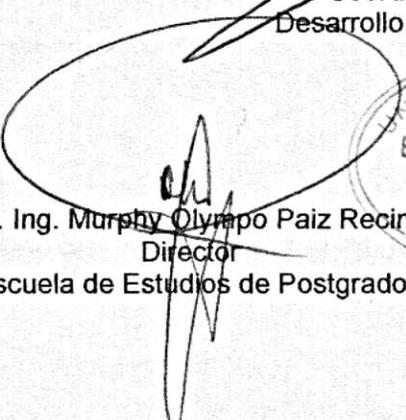
*"Id y Enseñad a Todos"*

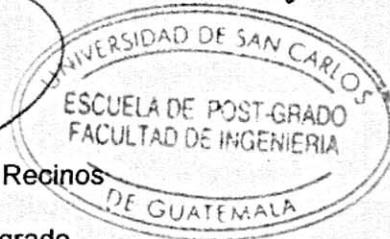
Ing. Rocío E. Reyna  
Colegiado No. 1716

  
Msc. Inga. Rocío Elizabeth Reyna  
Asesor (a)

Ing. Juan C. Fuentes M.  
M.Sc. Hidrología  
Colegiado No. 2,504

  
Msc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepedue  
Coordinador de Área  
Desarrollo Social y Energético

  
MSc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado



Cc: archivo  
/ec



Ref.EIQ.TG.058.2016

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el informe de la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería del estudiante, **DANIEL EDUARDO ARÉVALO YANCOS**, ha optado por la modalidad de estudios de postgrado para el proceso de graduación de pregrado, que para ello el estudiante ha llenado los requisitos establecidos en el normativo respectivo y luego de conocer el dictamen de los miembros del tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el **Informe del Diseño de Investigación del Programa de Maestría en ENERGÍA Y AMBIENTE** titulado **"DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO Y SU APROVECHAMIENTO EN EL MUNICIPIO DE PALÍN, ESCUINTLA"**. Procede a **VALIDAR** el referido informe, ya que reúne la coherencia metodológica requerida por la Escuela.

*"Id y Enseñad a Todos"*



Ing. Carlos Salvador Wong Davi  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, octubre de 2016

Cc: Archivo  
CSWD/ale

Universidad de San Carlos  
de Guatemala

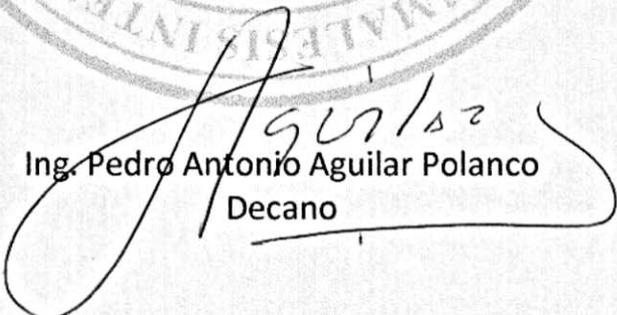


Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 485.2016

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 Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO Y SU APROVECHAMIENTO EN EL MUNICIPIO DE PALÍN, ESCUINTLA**, presentado por el estudiante universitario: **Daniel Eduardo Arévalo Yancos**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, octubre de 2016

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por ser el creador, estar conmigo cada día y ayudarme a alcanzar esta meta.
<b>M madre</b>	Sandra Arévalo, por todo su esfuerzo y el apoyo que me ha dado durante toda la vida.
<b>Mi esposa</b>	Marleny Blanco, por su amor y por siempre mantenerse a mi lado siendo mi motivación.
<b>Mis abuelos</b>	Benedicto Arévalo y Elena Yancos, su amor y esfuerzo siempre han sido una fuente de inspiración. No encuentro las palabras para agradecerles todo.
<b>Mi familia</b>	Gustavo, Gustavo hijo y Beatriz Berganza, por su influencia positiva a lo largo de mi vida.
<b>Señor Jhonatan Ríos</b>	Por su amistad incondicional.
<b>Señor Jorge Hernández</b>	Por su amistad, apoyo y acompañarme siempre en las buenas y las malas.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Mi *alma mater*, por ser la fuente de conocimiento por excelencia para el pueblo de Guatemala.

**Facultad de Ingeniería**

Por la oportunidad que me brindó y tener excelentes profesionales, siempre dispuestos a apoyarnos como estudiantes.

**Mis amigos de la  
Facultad**

Bárbara Martínez, Débora Santizo, Darwin Jocholá, Nelson Velásquez, Ingrid Aroche, Mary Carrillo, Roxana Guzmán, Emmanuel Miguez, Manuel Cazali, Christopher Antista, Carlos Álvarez y Beatriz Rosado.

**Mi asesora, la Inga.  
Rocío Reyna**

Por su apoyo, tanto en la carrera como en maestría.

**Mis tíos**

Daniel, José Alfredo y Fernando Arévalo, gracias por su apoyo.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
GLOSARIO .....	V
RESUMEN.....	IX
OBJETIVOS.....	XI
HIPÓTESIS.....	XIII
JUSTIFICACIÓN.....	XV
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. ANTECEDENTES .....	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
3. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	5
4. MARCO TEÓRICO.....	7
4.1. Energía.....	7
4.1.1. Energía renovable .....	7
4.1.1.1. La energía solar.....	7
4.1.1.2. La energía geotérmica.....	7
4.1.1.3. La energía hidroeléctrica .....	8
4.1.1.4. Energía proveniente de biomasa .....	8
4.1.1.5. La energía eólica .....	8
4.2. Contexto nacional.....	9
4.3. Historia de la energía eólica .....	9
4.3.1. Principales productores .....	10

4.4.	Ubicación geográfica del municipio de Palín.....	11
4.5.	Potencial eólico .....	12
4.5.1.	Determinación del potencial eólico.....	14
5.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	15
6.	METODOLOGÍA .....	17
7.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN .....	21
8.	CRONOGRAMA .....	23
9.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO.....	25
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	27

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1. Mapa de Palín, Escuintla..... 12

### TABLAS

- I. Principales países productores de energía eólica ..... 11
- II. Alturas de la rugosidad superficial según el tipo de terreno ..... 18
- III. Coeficientes de correlación para distintos tipos de terreno a  
determinadas alturas..... 19
- IV. Cronograma de actividades ..... 23



## GLOSARIO

<b>Capacidad instalada</b>	Volumen de producción de bienes y servicios que le es posible generar a una unidad productiva del país de acuerdo con la infraestructura disponible.
<b>Efecto Venturi</b>	Fenómeno en el que un fluido en movimiento dentro de un conducto cerrado disminuye su presión cuando aumenta la velocidad al pasar por una zona de sección menor.
<b>Energía</b>	La energía es la capacidad de los cuerpos o conjunto de estos para efectuar un trabajo.
<b>Energía eléctrica</b>	Forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos.
<b>Energía eólica</b>	Energía cinética del aire, es producida por los vientos y se aprovecha en los molinos de viento en los aerogeneradores.
<b>Energía no renovable</b>	Fuentes de energía que se encuentran en la naturaleza en cantidades limitadas y que son consumidas a una tasa mayor de la que se producen.

<b>Generador eléctrico</b>	Aparato o máquina que dispone de la capacidad de transformar la energía mecánica en energía eléctrica.
<b>Matriz energética</b>	Representación cuantitativa de toda la energía disponible, en un determinado territorio, región, país, o continente para ser utilizada en los diversos procesos productivos.
<b>Orografía</b>	Se refiere tanto a las elevaciones que puedan existir en una zona en particular como a la descripción de las mismas que realiza la geomorfología.
<b>Parque eólico</b>	Agrupación de aerogeneradores que transforman la energía eólica en energía eléctrica.
<b>Petróleo</b>	Líquido natural oleaginoso e inflamable, más liviano que el agua y de olor fuerte, que se encuentra en el interior de la Tierra.
<b>Potencia</b>	Es el trabajo o transferencia de energía realizada en la unidad de tiempo. Se mide en watt (W) o kilowatt (kW).
<b>Presión</b>	Magnitud física que mide la fuerza por unidad de área.

**Trabajo**

Es el producto de una fuerza aplicada sobre un cuerpo y del desplazamiento del cuerpo en la dirección de esta fuerza.

**Turbina**

Motor basado en la rotación de una rueda con paletas curvas, colocadas en su periferia, que recibe el impacto de una corriente de vapor, aire o agua.



## RESUMEN

Actualmente en Guatemala, la principal fuente de energía es la leña, seguida del petróleo. Estas son fuentes de energía no renovables, productoras de gases de efecto invernadero y causantes de un alto impacto en el ambiente. Por tanto, deben buscarse fuentes de energía alternas, renovables y con un menor impacto ambiental.

La energía eólica es una fuente de energía renovable, la cual transforma la energía cinética del viento en energía eléctrica. La cantidad de gases de efecto invernadero producida por un parque eólico es considerablemente menor a la cantidad generada a través del uso de petróleo para producir la misma cantidad de energía.

Uno de los lugares más propicios para un parque eólico en Guatemala es el cañón de Palín, ya que debido a su estructura geográfica el viento proveniente del sur aumenta su velocidad.

La determinación del potencial eólico de un área indica la cantidad de energía que se puede obtener de la misma. Debido a que el potencial eólico de un área depende de varios factores, es necesario realizar un estudio previo en el que se consideren factores como la rugosidad del terreno, velocidad del viento, densidad del viento y la dirección predominante del mismo.

Para la realización de este estudio se plantea determinar el potencial eólico del municipio de Palín, dividiendo el territorio en áreas más pequeñas

con el fin de determinar el área más apropiada para la construcción de un parque eólico.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Determinar el potencial eólico del municipio de Palín, Escuintla en MW.

### **Específicos**

1. Determinar velocidades promedio del viento durante el año, en m/s.
2. Determinar el área óptima de ubicación para una planta de generación de energía eólica en el municipio de Palín, Escuintla.
3. Determinar la dirección predominante del viento en el municipio de Palín, Escuintla.



## **HIPÓTESIS**

El potencial eólico del municipio de Palín, Escuintla es suficiente para cubrir las necesidades de la población estimada del mismo, ya que es mayor a la necesidad de energía de la población.



## JUSTIFICACIÓN

La determinación del potencial eólico del municipio de Palín, Escuintla, proporcionará información para establecer la cantidad de energía que se puede obtener de este recurso, que actualmente es poco explotado; el cual puede ser utilizado para complementar a las fuentes de energía que en la actualidad alimentan al sector.

La determinación de los picos de energía eólica que, según Mur, J. (2015), son estacionales, puede ayudar a predecir cuánta energía proveniente de otras fuentes se necesitará en los períodos de calma.

Al incorporar un sistema de generación de energía eólica al sistema de suministro energético, se pueden obtener beneficios como la disminución de emisiones de gases invernadero y la reducción de costos al usuario final, ya que el costo de mantenimiento y operación es bajo.

Con esto se puede disminuir el uso de combustibles fósiles en el país, y asimismo, diversificar la matriz energética de este.



## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo determinar el potencial eólico del municipio de Palín, Escuintla y su aprovechamiento. Con esto se busca aprovechar una fuente de energía renovable y poco explotada actualmente en el país.

La energía eólica es obtenida convirtiendo la energía cinética del viento en energía mecánica por medio de una turbina, y luego convertida a energía eléctrica a través de un generador. El potencial eólico es la energía eléctrica que puede ser generada en un determinado lugar a partir de la energía eólica.

Para determinar el potencial eólico se utilizarán datos de viento provenientes del Instituto Nacional de Electrificación (INDE) y del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh).

Debido a que la velocidad del viento no es constante, se estimará un promedio por un período de 3 años, determinando la variación durante cada mes del año. A partir de estos datos, se determinará el potencial eólico y se estimará la cantidad de energía eléctrica necesaria para satisfacer las necesidades de la población del municipio. Con esto se busca determinar si es posible cubrir la demanda solamente con energía eólica o si es necesario utilizar un sistema conectado a otra red de energía eléctrica.

Se describirá qué es energía y los tipos de energía renovable, el contexto energético nacional. La energía eólica y sus productores a nivel mundial; la

monografía de Palín, Escuintla. Asimismo, la descripción del potencial eólico, cómo se determina el mismo y qué factores influyen en él.

## 1. ANTECEDENTES

Actualmente, alrededor del mundo la energía es el principal impulso de la humanidad. La principal fuente de energía en el mundo es el petróleo, el cual provee alrededor del 37 % del total de energía utilizada. Se estima que las fuentes de petróleo se agotarán en unos 50 a 90 años y por esto, los estudios sobre fuentes alternas de energía se han intensificado en las últimas décadas.

En Guatemala se han realizado estudios como el *Análisis del mercado guatemalteco de energía renovable*, realizado por el Banco Centroamericano de Integración Económica (Rodríguez, H., 2009). En este estudio se analiza el contexto general de Guatemala, así como proyectos de generación de energía eléctrica.

Con respecto a la energía eólica, se han realizado estudios en la Universidad de San Carlos como: *Características a considerar en el diseño de una central eólica en Guatemala* (Ochoa, H., 1998); *Análisis de la energía eólica en Guatemala* (Morales, E., 1985), y recientemente, *Estudio de factibilidad de realización de un proyecto de energía eólica, a realizarse en el Instituto Tecnológico Universitario Guatemala-Sur, ITUGS de Palín, Escuintla* (Pirique, H., 2013), en el que se determinó que la instalación de un sistema de energía eólica para cubrir parcialmente la demanda de energía del ITUGS, es factible.

En la actualidad, Centro América cuenta con varios proyectos de parques eólicos. En Honduras se puede encontrar el parque eólico más grande de Centro América, el Cerro de Hula. Este cuenta con una capacidad cercana a

102 MW con una expansión de alrededor de 20 MW planeada a corto plazo (Empresa Nacional de Energía Eléctrica ENEE, 2015).

El parque eólico en funcionamiento más grande de Guatemala está localizado en San Antonio El Sitio, municipio de Villa Canales. Este tiene la capacidad de producir hasta 50 MW, contando con 16 aerogeneradores, según Programa: Energías renovables y eficiencia energética en Centroamérica (2015).

Existen otros dos proyectos de parques eólicos en Guatemala, Viento Blanco, ubicado en el municipio de San Vicente Pacaya en Escuintla, con una capacidad de 20 MW, y La Cumbre en Jutiapa, Jutiapa con una capacidad aproximada de 50 MW.

Según Programa: Energías renovables y eficiencia energética en Centroamérica (2014), Steven Andrews, inventor guatemalteco, desarrolló un generador eólico que registró en la Oficina de Patentes de Estados Unidos. Esta turbina utiliza tecnología reciente y ofrece ser menos costoso y más fácil de instalar que las actuales torres que se utilizan para generar energía eólica.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Guatemala, por su ubicación geográfica, se puede considerar como un país privilegiado. El país cuenta con varios recursos que pueden ser explotados para el beneficio de la población desde un punto de vista energético. Ante la crisis energética que se está dando en este momento y el cambio climático que ocurre en el planeta, es necesario buscar fuentes alternativas de energía.

El problema es el uso y dependencia de energías no renovables. La principal fuente de energía del país es la leña (Ministerio de Energía y Minas, 2012). La generación de energía eléctrica en Guatemala dependía en un 24,2 % de bunker y un 8,09 % de carbón en el 2012 (Ministerio de Energía y Minas, 2012), esta cifra ha aumentado en los últimos años debido a la introducción de la planta de Jaguar Energy.

Entre las fuentes de energía alternas en las que Guatemala tiene un potencial no explotado, se encuentra la energía eólica, que es la energía obtenida a través del viento. Esta investigación se enfocará en la obtención de energía eólica en el municipio de Palín, Escuintla.

- ¿Cuál es el potencial energético que se puede obtener del viento en el municipio de Palín? Al tratar de responder esta pregunta, surgen tres más:
  - ¿Cuál es la velocidad promedio del viento en el municipio?
  - ¿Cuál es la dirección predominante del viento?

- ¿Cuál es el área de ubicación óptima para la instalación de un parque eólico en el municipio de Palín?

Para responder a estas preguntas se utilizarán datos obtenidos por organizaciones como el Instituto Nacional de Electrificación (INDE) y por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh).

Determinar el lugar de ubicación óptima de un parque eólico es de suma importancia, ya que el comportamiento del viento varía a lo largo del municipio, por lo que es recomendable realizar un estudio previo a la instalación de un parque eólico.

A partir de estos datos se determinará el potencial eólico del municipio; el potencial eólico servirá para determinar la cantidad de energía que se puede obtener de dicha fuente.

### **3. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN**

El presente trabajo de graduación propone determinar el potencial eólico del municipio de Palín, Escuintla y proponer su posible aprovechamiento; con el objetivo de beneficiar a la población del municipio al determinar la cantidad de energía que se puede proveer de la misma, utilizando un recurso natural no aprovechado actualmente.

La determinación del potencial eólico del municipio ayuda a realizar propuestas concretas en torno a la utilización de dicha energía y su viabilidad. El aprovechamiento del recurso eólico puede fomentar la disminución de la leña como combustible en la población que no cuenta con instalaciones eléctricas en el municipio.

El estudio abarcará la región geográfica del municipio, utilizando datos de viento del 2013, 2014 y 2015.



## **4. MARCO TEÓRICO**

### **4.1. Energía**

Es la capacidad de un cuerpo para realizar un trabajo. Desde el punto de vista de la mecánica, el trabajo es realizado cuando una fuerza es ejercida sobre un cuerpo y el estado de movimiento del mismo es alterado.

#### **4.1.1. Energía renovable**

Es la que proviene de fuentes que pueden regenerarse más rápidamente de lo que se consumen, o bien, que por la cantidad de energía presente pueden considerarse inagotables. Entre las energías renovables se encuentran: solar, eólica, geotérmica, hidroeléctrica y la biomasa.

##### **4.1.1.1. La energía solar**

Como lo indica su nombre proviene del sol. Esta se puede considerar inagotable. Esta puede ser transformada en energía eléctrica mediante celdas fotovoltaicas, las cuales pueden ser integradas a un sistema que utiliza otra fuente de energía.

##### **4.1.1.2. La energía geotérmica**

Es la que proviene del calor presente en el interior del planeta. Esta fuente de energía, también puede ser considerada inagotable, ya que se obtiene del calor presente en el núcleo del planeta. Para convertir esta energía en energía

eléctrica se utiliza un sistema de calentamiento de agua, la cual se evapora gracias a la energía geotérmica. Dicho vapor impulsa un sistema de turbinas, las cuales generan electricidad. En Guatemala este tipo de energía podría ser aprovechada debido a que cuenta con tres volcanes activos.

#### **4.1.1.3. La energía hidroeléctrica**

Esta se obtiene a partir de la energía potencial acumulada por cuerpos de agua que se utilizan para accionar turbinas, que a la vez mueven un generador eléctrico. En Guatemala es la principal fuente de energía eléctrica.

#### **4.1.1.4. Energía proveniente de biomasa**

La biomasa es materia orgánica proveniente de desechos, agricultura dedicada a este fin y residuos. La energía proveniente de la biomasa es aquella que se obtiene de procesos como la transesterificación de aceites para fabricación de biodiesel o la biodigestión de desechos. La energía de la biomasa, también puede obtenerse de la quema directa de la misma.

#### **4.1.1.5. La energía eólica**

Es la que se obtiene al convertir la energía cinética contenida en el viento. Para esto se utilizan aerogeneradores los cuales, a través de aspas, hacen girar un rotor y la convierten en energía eléctrica. Estas son utilizadas en parques eólicos en conjunto para la producción de electricidad, la cual puede ser distribuida al consumidor o utilizada como auxiliar en un sistema proveniente de otra fuente de energía, como una red hidroeléctrica (Almonacid, 2009).

## **4.2. Contexto nacional**

En Guatemala, el Ministerio de Energía y Minas es el encargado de propiciar y ejecutar las acciones que permitan la inversión destinada al aprovechamiento de recursos naturales destinados a proveer bienes y servicios energéticos.

Este ente es el encargado también de establecer, implementar y actualizar la Política Energética Nacional. Busca asegurar el abastecimiento de combustible y energía eléctrica, así como fomentar el ahorro y uso eficiente de la energía y la reducción del uso de leña en el país. Su principal objetivo es utilizar el desarrollo sostenible como un eje transversal de la política.

La matriz energética es una representación cuantitativa de la energía disponible en un territorio determinado, que puede ser utilizada para diversos procesos.

De acuerdo a la Política Energética 2013-2027 (Ministerio de Energía y Minas, Guatemala, 2013), el consumo energético nacional proviene en su mayoría de la leña con un 56,84 %, derivados de petróleo con un 33,66 % y electricidad con un 9,5 %.

La energía eléctrica del país proviene, principalmente de hidroeléctricas con un 51,4 %, seguido de bunker con un 24,2 %.

## **4.3. Historia de la energía eólica**

La energía eólica ha sido utilizada por la humanidad desde la antigüedad, al principio para impulsar barcos por medio de velas y más tarde en molinos de

viento. Los primeros molinos de viento se registran en Afganistán alrededor del siglo VII, y aparecen en Europa en el siglo XII, en Francia e Inglaterra.

Actualmente se utilizan turbinas eólicas. En este campo, aún se esperan incrementos de eficiencias y reducciones de costos como consecuencia de las curvas de aprendizaje (Asociación Mexicana de Energía Eólica, 2012).

#### **4.3.1. Principales productores**

La producción aproximada de esta fuente de energía es 370 000 MW en todo el mundo (Asociación Mundial de la Energía Eólica 2015).

El principal productor de energía eólica en el mundo es China, quienes cuentan con alrededor de 80 parques eólicos. Este país tiene una capacidad total de 114 736 MW, según la Asociación Mundial de la Energía Eólica con datos actualizados a finales de 2014.

Seguido de ellos se encuentra los Estados Unidos de Norte América, quien posee una capacidad cercana a los 65 879 GW. El parque eólico más grande está localizado en el estado de Texas y tiene una potencia de 781 MW.

El tercer mayor productor es Alemania, seguido de España, en donde los parques eólicos abastecen cerca del 16 % de los requerimientos de energía eléctrica del país.

Tabla I. Principales países productores de energía eólica

**Wind Energy Worldwide**  
Top 12 countries by total wind installations

Position 2013	Country/Region	Total capacity end 2014 ** [MW]	Added capacity 2014 *** [MW]	Growth rate 2014 [%]
1	China	114'763	23'350,0	25,7
2	USA	65'879	4'854,0	7,8
3	Germany	40'468	5'808,0	16,8
4	Spain	22'987	27,5	0,1
5	India	22'465	2'315,1	11,5
6	United Kingdom	11'998	1'467,0	13,9
7	Canada	9'694	1'871,0	25,9
8	France	9'296	1'042,0	12,6
9	Italy	8'663	107,5	1,3
10	Brazil	6'182	2'783,0	81,9
11	Sweden	5'425	1'050,0	21,4
12	Denmark *	4'850	78,0	1,6
	Rest of the World	47'300	7'000 (estimated)	16,0
	<b>Total</b>	<b>370'000</b>	<b>51'753</b>	<b>16,2</b>

\* by november 2014  
\*\* Includes all installed wind capacity, connected and not-connected to the grid.  
\*\*\* Includes the net capacity added during the year 2014.

© WWEA - 2015

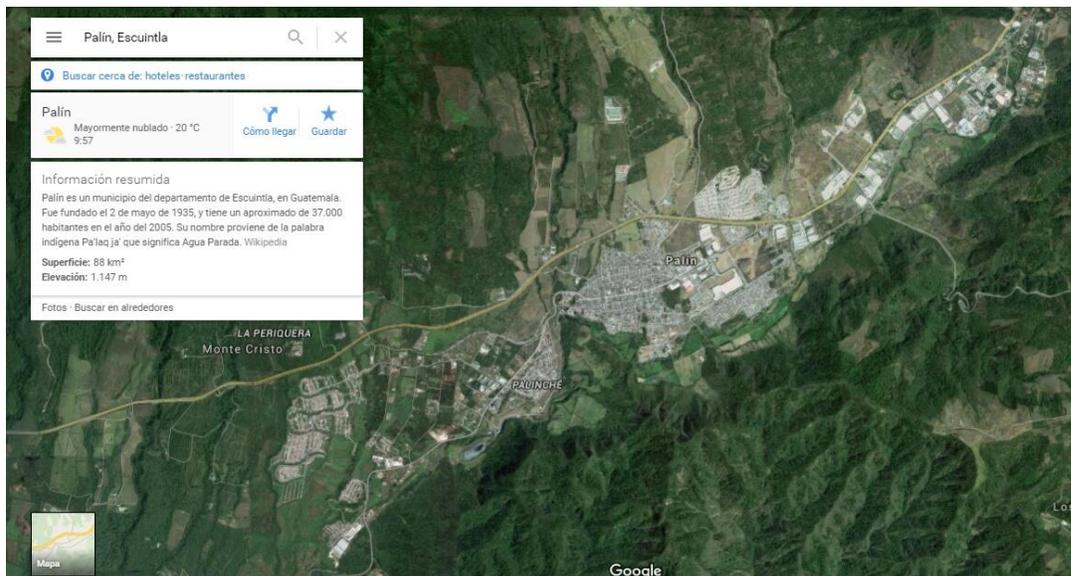
Fuente: Asociación Mundial de la Energía Eólica. <http://www.wwindea.org/new-record-in-worldwide-wind-installations/>. Consulta: 15 de junio de 2015.

#### 4.4. Ubicación geográfica del municipio de Palín

De acuerdo al Ministerio de Energía y Minas (Política Energética 2013-2027. 2012), Guatemala cuenta con un potencial eólico de 280 MW, de los cuales, en ese momento no se tenía ningún aprovechamiento.

Palín es un municipio del departamento de Escuintla en Guatemala, con una población aproximada de 37 000 habitantes (2005). Este se encuentra a una latitud de 14,4 y longitud -90,7. Está localizado a 40 kilómetros al sur de la ciudad capital de Guatemala, a 12 kilómetros al sur del lago de Amatitlán, y a 17 kilómetros al norte de la cabecera departamental de Escuintla (Pirique, 2013).

Figura 1. Mapa de Palín, Escuintla



Consulta: Google Maps. Consulta: 15 de junio de 2015.

Debido a la ubicación geográfica del cañón de Palín los vientos provenientes del norte y del sur convergen en el municipio (Vuelo Libre Guatemala, 2015). En este lugar se puede observar un aumento de la velocidad de los vientos debido al efecto Venturi que se observa en el cañón. El efecto Venturi en mecánica de fluidos se refiere al aumento de velocidad debido a una disminución de la presión (Munson, B., Okiishi, T., Young D., 1999). En este caso se da una disminución de la presión cuando el viento entra al cañón de Palín, en donde disminuye el área en la que se encuentra, por lo que su velocidad aumenta.

#### 4.5. Potencial eólico

Es la cantidad de energía eléctrica que se puede obtener a partir de la energía eólica de un determinado lugar. El poder del viento es generalmente

consistente cada año, pero presenta variaciones en periodos más cortos de tiempo.

En una región, el potencial eólico se puede ver afectado por factores topográficos y climatológicos (Universidad de Tarapacá, 2015).

Los factores topográficos que pueden afectar el potencial eólico son:

- Resguardo: es la existencia de obstáculos cercanos, los cuales pueden disminuir la velocidad del viento.
- Rugosidad: es el efecto que tienen tanto la superficie del terreno y los obstáculos como la vegetación.
- Orografía: se refiere a acantilados y colinas. La velocidad del viento varía, en las cimas sufre una aceleración, mientras que en los pies de valles desacelera.

Los factores climatológicos que afectan el potencial eólico de una región son:

- La velocidad y dirección del viento: la distancia que recorre el viento por unidad de tiempo. El contenido energético del viento depende directamente de su velocidad. Esta se mide generalmente en la escala Beaufort, la cual varía del 0 (calma) al 12 (huracán).
- Porcentaje de calmas: período de calma se refiere a una velocidad del viento igual a cero.
- Temperatura del aire: afecta su densidad, lo que impacta directamente el potencial eólico, ya que la cantidad de aire que pasa a través del generador puede disminuir.

Presión atmosférica: al igual que la temperatura, la presión afecta directamente el volumen y, por tanto, la masa de aire que pasa por el generador.

#### **4.5.1. Determinación del potencial eólico**

Para determinar el potencial eólico de una masa de aire es necesario conocer su velocidad. Para esto se cuenta con datos obtenidos de entidades como el INDE y el Insivumeh. Estas instituciones utilizaron anaerómetros para dichas mediciones.

## **5. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS**

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

GLOSARIO

RESUMEN

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

INTRODUCCIÓN

1. ENERGÍA

2. CONTEXTO NACIONAL

3. HISTORIA DE LA ENERGÍA EÓLICA

4. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL MUNICIPIO DE PALÍN

5. POTENCIAL EÓLICO

6. RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS



## 6. METODOLOGÍA

Para determinar el potencial eólico en el presente estudio se utilizarán datos de medición del viento durante un período de los últimos 3 años. En caso de ser necesario se realizarán extrapolaciones, tanto horizontales como verticales para determinar la velocidad del viento en otros puntos de la zona o a diferentes elevaciones para las cuales no se cuenta con datos (Moreno, 2015).

Para esto se dividirá en áreas los 88 km<sup>2</sup> del municipio. Se calculará el potencial individual de cada área para luego determinar el total.

Las extrapolaciones necesarias para determinar la velocidad del viento en distintos tipos de terreno y distintas elevaciones se realizarán de acuerdo al método propuesto por Moreno.

$$V_z = V_{zr} \left( \frac{\ln(60/Z_{or}) * \ln(Z/Z_o)}{\ln(60/Z_o) * \ln(Z_r / Z_{or})} \right) \quad \text{[Ecuación 1]}$$

Donde:

$V_z$ : velocidad media anual en el sitio que se desea calcular a una altura del eje  $z$

$V_{zr}$ : velocidad media anual de la estación de referencia a una altura  $Z_r$

$Z$ : altura del eje del rotor de la máquina eólica

$Z_r$ : altura del aparato de medición en la estación de referencia

$Z_o$ : altura de la rugosidad superficial en el sitio donde se desea conocer la velocidad del viento

$Z_{or}$ : altura de la rugosidad superficial en la estación de referencia

El indicador de rugosidad del terreno se caracteriza por un indicador conocido por altura de la rugosidad superficial (Moreno, 2015). La tabla II las describe.

Tabla II. **Alturas de la rugosidad superficial según el tipo de terreno**

<b>Tipo de terreno</b>	<b>Característica</b>	<b>Valor de Zo, m</b>
Llano	Playa, océano, superficies arenosas	0,0003
Abierto	Hierba baja, aeropuertos, tierras de cultivos vacías	0,030
Poco rugoso	Hierba alta, cultivos bajos	0,100
Rugoso	Cultivos altos alineados, árboles bajos	0,250
Muy rugoso	Bosques naturales	0,500
Cerrados	Poblados, suburbios	> 1,000
Ciudades	Centro de ciudades, espacios abiertos en bosques	> 2,000

Fuente: elaboración propia.

Utilizando la ecuación 1 se obtiene la tabla III para determinadas alturas y tipos de terreno:

Tabla III. **Coefficientes de correlación para distintos tipos de terreno a determinadas alturas**

Tipo de superficie del terreno	Altura, m					
	5	10	12	14	16	18
Playa, océano, superficies arenosas, Zo = 0,0003 m	0,80	0,85	0,87	0,88	0,89	0,90
Hierba baja, aeropuertos, tierras de cultivos no sembradas, Zo = 0,03 m	0,67	0,76	0,79	0,81	0,83	0,84
Hierba alta, cultivos bajos, Zo = 0,10 m	0,61	0,72	0,75	0,77	0,79	0,81
Cultivos altos alineados, árboles bajos, Zo = 0,25 m	0,55	0,67	0,71	0,73	0,76	0,78
Bosques naturales, Zo = 0,50 m	0,48	0,63	0,66	0,70	0,72	0,75

Fuente: elaboración propia.

Utilizando esta tabla se utiliza la siguiente fórmula para determinar la velocidad del viento en el lugar seleccionado:

$$V_z = V_{zr} * C_z / C_{zr} \quad \text{[Ecuación 2]}$$

Donde:

$V_z$ : velocidad del viento en el lugar seleccionado a una altura z

$V_{zr}$ : velocidad del viento en el sitio de referencia a una altura  $z_r$

$C_z$ : coeficiente en el sitio seleccionado a una altura z

$C_{zr}$ : coeficiente en el sitio de referencia a una altura z

La dirección predominante del viento se obtendrá utilizando los datos obtenidos y determinando el promedio de velocidad para cada dirección. Una

vez tabulados los resultados, se presentarán datos para cada dirección cardinal del mismo.

Utilizando los datos de la velocidad promedio del viento para cada área establecida, se determinarán las constantes de la denominada ecuación de Weibull (Álvarez, 2013). Con este método se clasificarán las velocidades en rangos definidos, y a partir de esto se determinarán los parámetros  $c$  de velocidad en m/s y  $k$ , que es el grado de dispersión de los datos.

Estos resultados proporcionarán el potencial eólico de cada área, de esta manera, determinando la ubicación óptima teórica para un parque eólico.

## **7. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN**

La información recopilada, es decir los datos de velocidad del viento medidas, serán agrupados por mes durante los distintos años. Esto se realizará con el fin de determinar la variación del viento durante el año.

Para el análisis de los datos se utilizarán métodos estadísticos, como la media para analizar el valor grupal de los datos y la desviación estándar para determinar la variación de los datos.

Se utilizará la herramienta Microsoft Excel 2013 y Google Sheets para la tabulación y análisis de datos.



## 8. CRONOGRAMA

Las actividades se realizarán de acuerdo al cronograma que se muestra en la tabla IV.

Tabla IV. **Cronograma de actividades**

Mes	1				2				3				4				5				6				7			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Actividad/Semana																												
Realización del protocolo	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■																
Presentación y aprobación del protocolo													■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
Recopilación de datos																									■	■		
Tabulación de datos																												
Análisis de datos																												
Conclusiones y presentación																												
Presentación y aprobación de informe final																												

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2011.



## 9. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El estudio será autofinanciado. Se prevé gastos en transporte y horas de trabajo por parte del investigador. Los datos a utilizar son de acceso público y no se utilizará ningún equipo de medición para obtener datos nuevos.

De igual manera, los honorarios del asesor serán financiados por el investigador.

Se cuenta con un presupuesto estructurado de la siguiente manera:

- Transporte (combustible, peaje): Q500,00
- Honorarios del asesor: Q2 000,00
- Honorarios del investigador: *ad honorem*

Gastos varios: Q1 000,00



## 10. BIBLIOGRAFÍA

1. Almonacid, A.; Nahuelhual, L. (2015). Estimación del potencial eólico y costo de producción de energía eólica en la costa de Valdivia, Sur de Chile. Recuperado de [http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0304-88022009000200004&lng=es&nrm=iso](http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-88022009000200004&lng=es&nrm=iso).
2. Álvarez, W.; Martínez, A.; Alvarado, A. Aplicación de la ecuación de Weibull para determinar potencial eólico en Tunja-Colombia. Universidad Libre de Colombia, Facultad de Ingeniería. 2013. 159 p.
3. Asociación Mexicana de Energía Eólica. (2015). Iniciativa para el desarrollo de las energías renovables en México. Recuperado de [http://www.energia.gob.mx/webSener/res/0/D121122%20Iniciativa%20Renovable%20SENER\\_Solar%20FV.pdf](http://www.energia.gob.mx/webSener/res/0/D121122%20Iniciativa%20Renovable%20SENER_Solar%20FV.pdf). 2012.
4. Asociación Mundial de la Energía Eólica. (2015). New record in worldwide wind installations. Recuperado de <http://www.wwindea.org/new-record-in-worldwide-wind-installations/>.

5. Empresa Nacional de Energía Eléctrica. (2015). 100 mil viviendas beneficiadas. Los primeros vientos de cambio en Honduras. Recuperado de <http://www.enee.hn/index.php/notas-relevantes/91-somos-categoria-limpia>.
6. Energías Renovables y Eficiencia Energética en Centroamérica. (2015). Eólica en Guatemala: primer parque eólico con 16 aerogeneradores de vestas. Recuperado de <http://www.energias4e.com/noticia.php?id=3311>.
7. Gobierno de Navarra. Energía eólica–Meteo Navarra. (2015). Recuperado de <http://meteo.navarra.es/energiasrenovables/energiaeolica.cfm>.
8. McCabe, W. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. México, McGraw-Hill.
9. *Medición efectuada en la finca El Sitio, aldea Los Llanos, Villa Canales, Guatemala correspondientes a los años 2011, 2012 y 2013*. (2015). Recuperada de <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2012/04/EL-SITIO-ALDEA-LOS-LLANOS-VILLA-CANALES-GUATEMALA.pdf>.
10. Montgomery, D. (2003). *Diseño y análisis de experimentos*. México, Limusa Wiley.

11. Moreno, F.; Herrera, O. (2015). Método simplificado para la determinación del potencial eólico cuando se desean instalar pequeñas máquinas eólicas. Recuperado de <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar24/HTML/articulo01.htm>.
12. Munson, B.; Okiishi, T.; Young, D. (1999). *Fundamentos de mecánica de fluidos*. México, Limusa.
13. Mur, J. (2015). Curso de energía eólica. Recuperado de <http://www.windygrid.org/manualEolico.pdf>.
14. Pirique, H. *Estudio de factibilidad de realización de un proyecto de energía eólica a realizarse en el Instituto Tecnológico Universitario Guatemala-Sur, ITUGS de Palín, Escuintla*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica Industrial. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2013. 148 p.
15. Programa: energías renovables y eficiencia energética en Centroamérica. (2015). Guatemalteco registra patente de turbina eólica. Recuperado de <http://www.energias4e.com/noticia.php?id=2926>.
16. Proyecto Tierra. (2015). Calendario solar del municipio de Palín. Recuperado de <http://tierra.tutiempo.net/Calendario/Calendario-Solar-de-Municipio-de-Palin-GT010740.htm>.

17. Renovables verdes. (2015). Los países que más energía eólica producen en la actualidad. Recuperado de <http://www.renovablesverdes.com/los-paises-que-mas-energia-eolica-producen-en-la-actualidad/>.
18. Universidad de Tarapacá. (2015). Energía eólica. Recuperado de <http://www.ceder.uta.cl/index.php?op=4>.
19. Velásquez, F. *Aprovechamiento de la energía eólica con otras fuentes de energía renovable en San José Pinula municipio de Guatemala, Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Eléctrica, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 2011. 116 p.