



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Maestría en Artes en Energía y Ambiente

**FACTIBILIDAD TÉCNICA ECONÓMICA DEL USO DE LA ENERGÍA EÓLICA EN EDIFICIOS  
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DEL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE  
SAN CARLOS DE GUATEMALA**

**Ing. Julio Rolando Barrios Archila**

Asesorado por el M.A. Ing. José Antonio Rosal Chicas

Guatemala, noviembre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**FACTIBILIDAD TÉCNICA ECONÓMICA DEL USO DE LA ENERGÍA EÓLICA EN EDIFICIOS  
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DEL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE  
SAN CARLOS DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ING. JULIO ROLANDO BARRIOS ARCHILA**

ASESORADO POR EL M.A. ING. JOSÉ ANTONIO ROSAL CHICAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN ARTES EN ENERGÍA Y AMBIENTE**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Núñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Mtro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez
SECRETARIA	Mtra. Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## 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:

**FACTIBILIDAD TÉCNICA ECONÓMICA DEL USO DE LA ENERGÍA EÓLICA EN EDIFICIOS  
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DEL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE  
SAN CARLOS DE GUATEMALA**

Tema que me fuera aprobado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 12 de julio de 2016.



Ing. Julio Rolando Barrios Archila

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Guía en todos mis proyectos de estudio, por su infinita misericordia me permitió tener la sabiduría necesaria para alcanzar este triunfo.
<b>Mis padres</b>	Julio Alberto Barrios y Graciela Archila, por su incondicional apoyo para alcanzar mis metas de estudio y de trabajo.
<b>Mi esposa e hijos</b>	Sobeyda de Barrios, José Manuel, Julio Enrique, Oscar Rolando y María Emilia Barrios, por sus motivaciones para culminar con éxito esta etapa de estudios.
<b>Mi familia en general</b>	Nietas, tíos, primos, hermanos y sobrinos con cariño.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por brindarme los conocimientos y experiencia necesaria para desempeñarme en mi vida profesional.

**Facultad de Ingeniería**

Porque en sus aulas se me ha permitido realizar mi vocación docente, como realizar de mejor manera el presente trabajo.

**Mis compañeros**

Por su amistad, apoyo y solidaridad incondicional en todo momento de la formación académica en la maestría.

**Mi asesor**

Ing. José Antonio Rosal Chicas, por su amistad y estrecha colaboración en este trabajo.

Ref.APT-2018-041

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 Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Artes en Energía y Ambiente titulado: "FACTIBILIDAD TÉCNICA ECONÓMICA DEL USO DE LA ENERGÍA EÓLICA EN EDIFICIOS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DEL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA " presentado por el Ingeniero Electricista **Julio Rolando Barrios Archila**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

*"Id y Enseñad a Todos"*

*Pedro Antonio Aguilar Bolanco*  
Maestro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Bolanco

Decano

Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, noviembre de 2018.

Cc: archivo/L.Z.L.A.

El Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado "FACTIBILIDAD TÉCNICA ECONÓMICA DEL USO DE LA ENERGÍA EÓLICA EN EDIFICIOS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DEL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA" presentado por el Ingeniero Electricista **Julio Rolando Barrios Archila**, correspondiente al programa de Maestría en Artes en Energía y Ambiente; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
**Maestro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí**  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, noviembre de 2018.

Cc: archivo/L.Z.L.A.

Ref.APT-2018-041

Como Coordinador de la Maestría en Artes en Energía y Ambiente doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado "FACTIBILIDAD TÉCNICA ECONÓMICA DEL USO DE LA ENERGÍA EÓLICA EN EDIFICIOS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DEL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA" presentado por el Ingeniero Electricista Julio Rolando Barrios Archila.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

Maestro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque  
Coordinador(a) de Maestría  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala



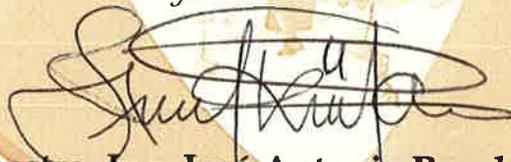
Guatemala, noviembre de 2018.

Cc archivo/L.Z.L.A.

En mi calidad como Asesor del Ingeniero Electricista **Julio Rolando Barrios Archila** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado **"FACTIBILIDAD TÉCNICA ECONÓMICA DEL USO DE LA ENERGÍA EÓLICA EN EDIFICIOS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DEL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA"** quien se encuentra en el programa de Maestría en Artes en Energía y Ambiente en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*



**Maestro. Ing. José Antonio Rosal Chicas**  
**Asesor(a)**

**Maestro en Energía y Ambiente**

**JOSÉ ANTONIO ROSAL**  
INGENIERO QUÍMICO INDUSTRIAL  
MAESTRO EN ENERGÍA Y AMBIENTE

Guatemala, noviembre de 2018.

**JOSÉ ANTONIO ROSAL**  
INGENIERO QUÍMICO INDUSTRIAL  
MAESTRO EN ENERGÍA Y AMBIENTE  
COLEGIADO No. 3337

Cc: archivo/LZ.L.A.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	IX
OBJETIVOS.....	XI
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO .....	XIII
INTRODUCCIÓN .....	XV
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Origen del viento .....	1
1.2. Potencial del viento .....	6
1.3. Límite de Betz.....	8
1.4. Medición del viento.....	9
1.4.1. Medida de la velocidad del viento.....	9
1.4.2. Medida de la dirección del viento.....	10
1.5. Caracterización energética del viento.....	11
1.5.1. Variación de la velocidad del viento con la altura ...	12
1.5.2. Variación de la velocidad del viento con la existencia de obstáculos.....	13
1.6. Clasificación de los aerogeneradores eléctricos.....	14
1.6.1. Microturbinas eólicas (potencias menores a 3 kW) .....	17
1.6.2. Pequeños aerogeneradores (potencias < 50 KW)..	18
1.6.3. Grandes generadores eólicos (potencias 1 a 5 Mw).....	18
1.7. Contador tipo bidireccional: .....	20

2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....	23
2.1.	Situación actual.....	23
2.2.	Aprovechamiento de la energía eólica. ....	23
2.3.	Mediciones de potencial eólico .....	25
2.3.1.	Definición de variables .....	27
2.3.2.	Mediciones .....	27
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	29
3.1.	Los resultados de la medición del viento se muestran a continuación .....	29
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS .....	33
4.1.	Densidad de la potencia eólica .....	33
4.2.	Modelo probabilístico de Weibull.....	37
5.	PRESUPUESTO Y EVALUACIÓN FINANCIERA.....	39
	CONCLUSIONES.....	43
	RECOMENDACIONES .....	45
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	47

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Circulación atmosférica de los vientos .....	3
2.	Circulación atmosférica general que incluye fuerza de Coriolis .....	4
3.	Brisa marina que se da al medio día y en la tarde .....	5
4.	Flujo del aire en el caso de un obstáculo montañoso .....	6
5.	Anemómetro.....	10
6.	Veleta .....	11
7.	Capa límite atmosférica.....	12
8.	Efecto de un obstáculo no aerodinámico sobre el flujo de viento.....	13
9.	Aerogenerador tipo Savonius.....	15
10.	Aerogenerador tipo Darrieus .....	16
11.	Aerogenerador híbrido Darrieus-Savonius .....	17
12.	Área de turbulencia sobre un edificio .....	20
13.	Contador Bidireccional con su marca color verde .....	21
14.	Esquema de conexiones contador de energía eléctrica bidireccional..	22
15.	Fotografía de ubicación de la Facultad de Ingeniería dentro del campus central de la zona 12 de la ciudad de Guatemala, Guatemala.....	24
16.	Mediciones de potencial eólico .....	26
17.	Escala de velocidades de viento .....	31
18.	Gráfica día 1.....	34
19.	Gráfica día 2.....	36
20.	Distribución Weibull (datos obtenidos) .....	38
21.	Turbina de eje vertical de 300/500 watts. ( <i>Solarstore</i> ).....	39

## TABLAS

I.	Medición del viento .....	29
II.	Medición del viento II .....	30
III.	Principales medidas estadísticas .....	35
IV.	Principales medidas estadísticas de los datos del segundo día .....	36
V.	Modelo probabilístico de Weibull .....	37
VI.	Tabla comparativa de inversión en la instalación de los aerogeneradores vrs ahorro en el pago de la factura de energía eléctrica .....	40
VII.	Análisis costo/beneficio de la inversión.....	41
VIII.	Comparativo de inversión contra ahorro de pago por consumo eléctrico .....	42

## GLOSARIO

<b>Aerogenerador</b>	Dispositivo que utiliza la energía del movimiento del viento para convertirla en energía eléctrica.
<b>Anemómetro</b>	Instrumento utilizado para la medición del viento.
<b>Área de barrido</b>	Área que intercepta un aerogenerador de acuerdo con las dimensiones de su rotor.
<b>Barómetro</b>	Instrumento utilizado para medir la presión atmosférica.
<b>Buje</b>	Eje de un aerogenerador.
<b>Distribución de Weibull</b>	Nombre de la función estadística que permite establecer la frecuencia con que ocurrirán vientos de determinadas velocidades.
<b>Energía cinética</b>	Energía que posee un cuerpo o sistema en virtud de su velocidad de movimiento y es expresada en Joules (J).
<b>Energía eólica</b>	Es la producida por los vientos y es aprovechable como la energía primaria para el movimiento de los aerogeneradores.

<b>Energía renovable</b>	Energía que se obtiene de la naturaleza y es capaz de regenerarse por sí misma.
<b>Factibilidad</b>	Disponibilidad de contar con los recursos necesarios para llevar a cabo una meta o proyecto establecido.
<b>Generador eléctrico</b>	Máquina capaz de transformar la energía primaria en energía eléctrica.
<b>Red eléctrica</b>	Sistema que permite transmitir y distribuir la energía eléctrica desde los generadores eléctricos hasta los usuarios o consumidores finales.
<b>Rotor</b>	Elemento del aerogenerador que por acción del viento tiene un movimiento de rotación sobre su eje.
<b>Perfil vertical del viento</b>	Velocidad del viento a diferentes alturas del terreno.
<b>Potencia</b>	Es la transferencia de energía que permite realizar un trabajo en la unidad de tiempo y se mide en vatios o watts.
<b>Veleta</b>	Instrumento que registra la dirección del viento.

## RESUMEN

Se realizó la investigación bibliográfica sobre el tema energía eólica, su definición y parámetros de operación. También se realizó una investigación sobre los consumos históricos de energía eléctrica en el edificio de la Facultad de Ingeniería del campus zona 12 de la Universidad de San Carlos de Guatemala identificado como T-3, así como en qué tiempo se podría recuperar la inversión.

Luego se efectuó una investigación de campo, la cual se complementó con la medición de parámetros de velocidad de viento en el área propuesta.

Posteriormente se realizó un estudio técnico sobre la factibilidad de la instalación de este equipo de generación en la terraza del edificio mencionado de la Facultad de Ingeniería. Esto permitiría aprovechar al máximo la velocidad del viento, dando diferentes alternativas de equipo eólico que podrían implementarse en el lugar, así como las instalaciones eléctricas adecuadas.

También se realizó un estudio económico sobre el costo del equipo a instalar y del ahorro que podría darse utilizando este tipo de tecnologías renovables.

Luego se llevó a cabo el análisis de resultados obtenidos. Esto indica la factibilidad de ejecutar este proyecto en el área propuesta.



## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Guatemala cuenta con una gran cantidad de recursos naturales de tipo renovable, los cuales tienen un alto potencial energético.

La fuente energética de mayor demanda en el país es la leña; se estima que la cobertura forestal del país alcanza los 37 000 km<sup>2</sup>, o sea un 34% de la superficie nacional con una tasa de deforestación de 2,1 % anual. (Comisión Nacional de Energía Eléctrica. CNN, 2013. p. 18).

Luego la matriz de generación eléctrica del país dependió en 2013, de un 32,95 % de la energía proveniente de fuentes no renovables, mientras que un 67,05 % dependió en el mismo periodo de fuentes renovables.

A nivel mundial los combustibles fósiles constituyen actualmente un 80 % de la generación de energía eléctrica.

Por otro lado, la demanda mundial de petróleo aumenta en promedio el 1 % anual, de 85 millones de barriles al día en el 2007 a 106 millones en el 2030 (*International Energy Agency , 2008*).

En la Universidad de San Carlos de Guatemala se tiene en general un alto consumo de energía eléctrica en las instalaciones.

Esto conlleva a una elevada facturación que disminuye las oportunidades de inversión en otros aspectos. Esta electricidad de acuerdo con lo anterior puede venir de diferentes fuentes, muchas de ellas no renovables.

Todo lo anterior obliga a plantear la pregunta principal de la investigación:

¿Será factible técnica y económicamente la instalación de aerogeneradores para la producción de energía eléctrica en la terraza del edificio T3 de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala?

Para dar respuesta a esta pregunta es necesario realizar otras preguntas secundarias que permitan conocer más sobre esta investigación:

1. ¿Cuál es el consumo de energía eléctrica actualmente de dicho edificio?
2. ¿Qué tipo de tecnología de turbinas eólicas del tipo urbano será la más recomendable para utilizar en el edificio T3 de la FIUSAC?
3. ¿Existirán las condiciones climatológicas adecuadas para la implementación de estas tecnologías?
4. ¿Cuál será el ahorro en el pago de la factura de energía eléctrica?
5. ¿En qué tiempo se puede recuperar la inversión?

# OBJETIVOS

## General

Evaluar técnica y económicamente la factibilidad de la generación de energía eléctrica con recursos eólicos, aplicables a edificios urbanos en específico a los de la Facultad de Ingeniería del campus central de la USAC.

## Específicos

1. Revisar el consumo actual de energía eléctrica en el edificio T3.
2. Evaluar la mejor tecnología disponible de generación eólica para ser ubicada en los edificios de la FIUSAC de acuerdo con sus necesidades energéticas.
3. Estimar el comportamiento del viento para determinar la mejor ubicación de los equipos de generación eólica, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
4. Realizar una proyección del ahorro en el consumo de la energía eléctrica, mediante la aplicación del proyecto eólico.
5. Evaluar la factibilidad económica de estas tecnologías y los consecuentes indicadores financieros.



## RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

La investigación realizada es del tipo cuantitativa descriptiva puesto que se recopilarán datos y se inferirá sobre los mismos un resultado.

Se realizó una Investigación Bibliográfica, recopilación de información existente sobre consumos de energía eléctrica (EEGSA) del edificio T3 e inspecciones en el área de estudio.

Se solicitó en la Universidad de San Carlos de Guatemala y en específico a la Facultad de Ingeniería, los permisos necesarios para la investigación de campo. Esta incluyó las visitas necesarias a la terraza del edificio T-3, así como de la obtención de la información histórica para establecer datos sobre los consumos de energía eléctrica del edificio.

Se realizaron las mediciones de potencial eólico en el campo con las variables a medir, como la velocidad del viento en metros por segundo. La utilización máxima de energía eléctrica en el edificio T3 de la Facultad de Ingeniería se da de 7:00 a 20:30 horas, solamente en ese horario se tomaron los datos de viento con un anemómetro digital. Dichos datos se fueron registrando cada 30 minutos.

Con los datos se obtuvo la desviación estándar del parámetro de velocidad del viento, así como velocidades máximas y mínimas del viento durante el tiempo medido. También se obtuvo la temperatura ambiente en grados Celsius, como un dato complementario brindado por el anemómetro utilizado.

Las ecuaciones del potencial eólico utilizadas en este trabajo fueron las ecuaciones mencionadas en el marco teórico.

Cuando la producción de energía eléctrica no sea utilizada en el edificio, debido a que el generador eólico estará funcionando las 24 horas del día y los 365 días del año, se propondrá dentro del estudio la instalación de un contador de energía eléctrica del tipo bidireccional, que mida en ambos sentidos, tanto la energía utilizada proveniente de la red de distribución de EEGSA como la energía generada por el aerogenerador y que pueda ser un excedente para inyectar en la red de distribución.

Luego, con las mediciones de campo se elaboró un perfil sobre el comportamiento del potencial eólico en el lugar, haciéndose un análisis sobre el generador que mejor se acopló a las necesidades de la demanda de electricidad del edificio.

Con los datos obtenidos y el equipo seleccionado se hace un análisis para determinar un retorno de la inversión.

## INTRODUCCIÓN

En este estudio se realizó un análisis de factibilidad técnica y económica que permita aprovechar la energía renovable eólica para la producción de la energía eléctrica consumida en el edificio T-3 de la Facultad de Ingeniería ubicada en el campus zona 12 de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Con la consiguiente ventaja del aprovechamiento de los recursos naturales renovables para obtener un ahorro o bien eliminar el pago de la factura de energía eléctrica.

Este trabajo de investigación se circunscribió al estudio y diseño de un sistema de generación de energía eléctrica por medio de la utilización de una energía renovable como lo es el viento para suministrar electricidad al Edificio T-3 de la Facultad de Ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala.

Con el estudio del sistema de generación eléctrica eólica, se incluyó la adición al mismo de un contador de energía eléctrica del tipo bidireccional el cual tiene la capacidad a diferencia de los convencionales, de medir los flujos de energía entrante y saliente, por lo que será una medición que permita a la universidad estatal como usuario, el autoabastecerse completa o parcialmente de la energía eléctrica producida por el generador eólico y el remanente de generación podrá ser entregado a la red de distribución de la Empresa Distribuidora de Electricidad del sector. Este a su vez entregará a la Universidad un crédito equivalente a la energía entregada en KWh, los cuales se aplicarán disminuyendo la energía consumida en el mismo periodo que se esté facturando.

En el capítulo 1, se realizó una investigación bibliográfica sobre los temas de las energías renovables, su definición y parámetros. También se realizó una investigación preliminar que describa los consumos históricos de energía eléctrica en el edificio T-3 de la Facultad de Ingeniería, e igualmente en que tiempo se recuperará la inversión realizada.

En el capítulo 2, se hizo una investigación de campo que se complementó con la medición de parámetros de velocidad de viento.

En el capítulo 3, se efectuó un estudio técnico sobre la factibilidad de la instalación de este equipo de generación en la terraza del edificio T-3 de la Facultad de Ingeniería, que permitan aprovechar al máximo la velocidad del viento. Con ello se darán las diferentes alternativas de equipo que podrán implementarse en el lugar, así como las instalaciones eléctricas adecuadas.

En el capítulo 4, se ejecutó un estudio económico sobre el costo del equipo a instalar y del ahorro que podría darse utilizando este tipo de tecnologías renovables.

En el capítulo 5, se llevó a cabo el análisis de resultados obtenidos. Esto debiera indicar la factibilidad o no de ejecutar este proyecto en el área aludida.

Al final se dieron las conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Origen del viento

La radiación solar que incide sobre todo el globo terráqueo provoca que la superficie terrestre se caliente de una forma desigual originando el movimiento de las masas de aire en la atmósfera en combinación con la rotación de la tierra creando a su vez los lineamientos de circulación eólica a nivel local, regional y también global.

Lo que sucede es que, debido a la topografía del terreno en los valles, montañas, así como en las costas, existe un diferencial de calentamiento producido por la diferencia del ángulo de incidencia de los rayos provenientes del sol. Esto para los valles y las montañas, y en las costas esta diferencia se presenta porque el agua y la tierra absorben en diferente grado esta radiación solar.

El fenómeno de los vientos es bastante complejo debido al hecho de que intervienen diferentes factores entre los que son más importantes:

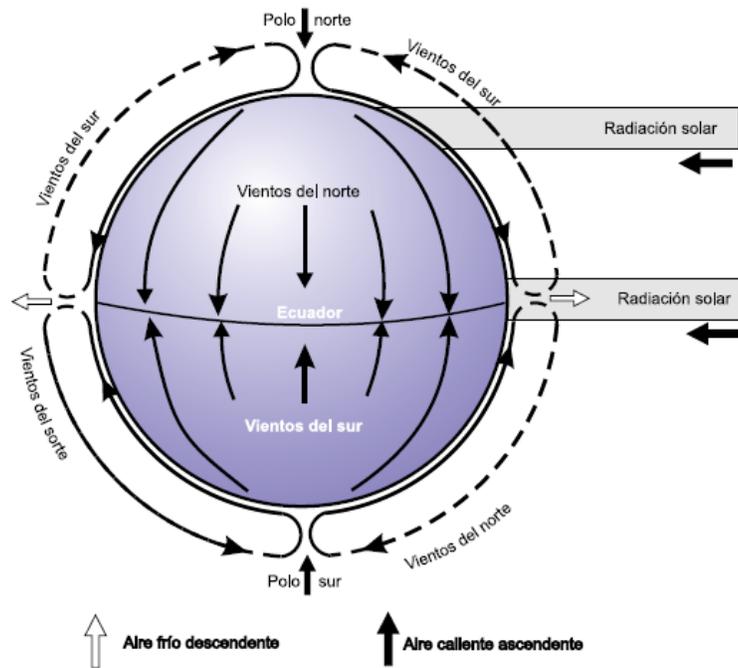
- La forma topográfica de cada continente modifica la trayectoria de los vientos en función de los obstáculos que pueda encontrar.
- La diferencia de los valores de calor específico (capacidad de cualquier material del almacenamiento de calor por unidad de masa) entre los océanos y los continentes.

- La variación de cantidad de insolación en las diferentes partes de la superficie terrestre, lo cual depende del movimiento de traslación que tiene la tierra alrededor del sol.
- Las diferencias en las perturbaciones atmosféricas que ocurren constantemente.

Los vientos generales que circundan el globo terrestre se llaman macro climáticos. Esto es debido a la orografía y las diferencias de presión varían sus características, lo que origina los vientos llamados micro climáticos o locales. Estos últimos pueden ser clasificados en: vientos inducidos térmicamente, vientos inducidos por la orografía y vientos generales influenciados por los efectos climáticos locales.

La energía eólica es el resultado indirecto de la energía producida por el sol, ya que el calentamiento de las masas de aire en la atmósfera provoca que se produzcan los vientos. Se iniciará con la explicación sobre los aspectos involucrados para la conversión de la energía del movimiento del viento en la energía eléctrica, a través de mecanismos o equipos que contienen las turbinas generadores más comúnmente llamados aerogeneradores.

Figura 1. **Circulación atmosférica de los vientos**

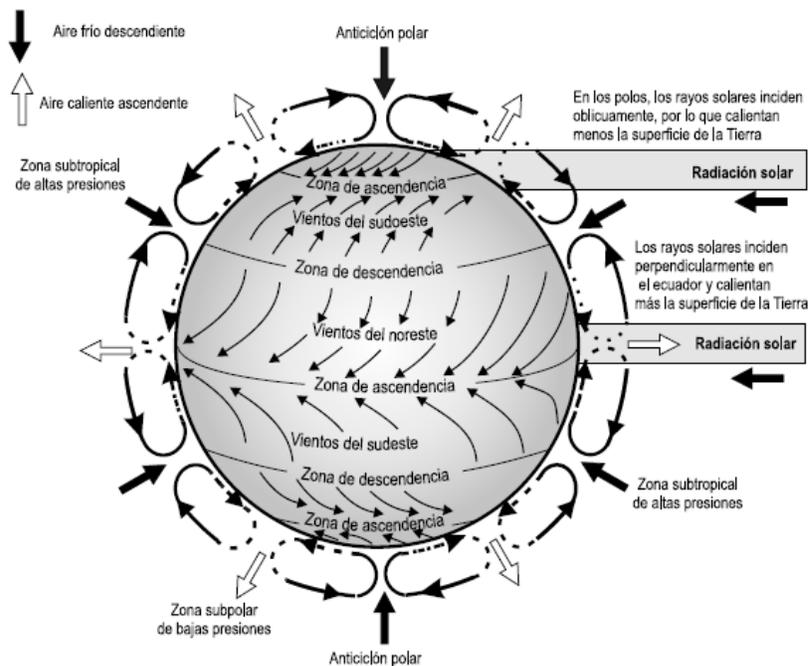


Fuente: Carta, 2009, pág. 336.

Para los cálculos referentes a la energía que puede proporcionar el viento, se debe conocer además de su velocidad media, duración de este y sobre todo las diferentes velocidades que pueden ocurrir en el transcurrir de días, semanas, meses y años. Todo lo anterior se conoce como la distribución de frecuencias del viento.

Tomando en cuenta el movimiento rotacional de la Tierra aparecen las denominadas fuerzas de Coriolis, que actúan sobre las masas de aire desviándolas hacia la izquierda en el hemisferio sur y hacia la derecha en el hemisferio norte. Igualmente, estas fuerzas originan los denominados vientos alisios provenientes del este y los vientos de poniente (del oeste).

Figura 2. **Circulación atmosférica general que incluye fuerza de Coriolis**



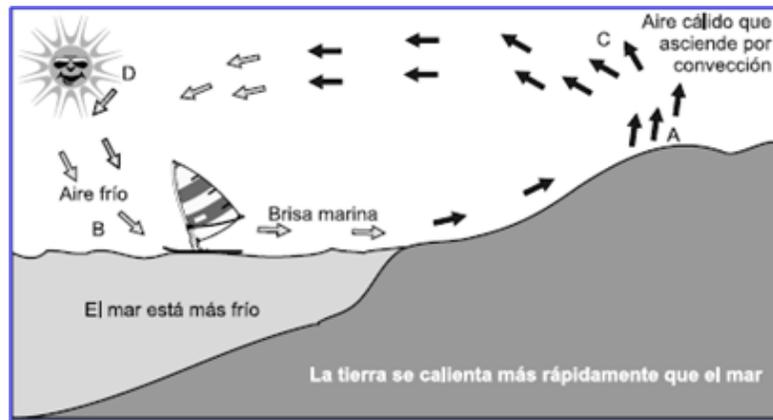
Fuente: Carta, 2009, pág. 337.

Con el nombre de macro climáticos se les denomina a todos los vientos que en general circulan en la tierra. Pero debido a la forma del relieve de los terrenos y a las diferentes presiones atmosféricas que pueden existir en ellos se forman los vientos locales o micro climáticos que a su vez, pueden dividirse en vientos inducidos por la temperatura, por el relieve de los terrenos (orografía) y los influenciados por los efectos locales del clima.

Entre los vientos inducidos por la temperatura (origen térmico) se encuentran las corrientes valle-montaña y las brisas marinas. Las brisas marinas tienen su origen como diferencia de los diferentes calores específicos, y la diferente velocidad de calentamiento y enfriamiento del mar y de la tierra.

Durante el día la tierra se calienta más rápidamente que el mar haciendo que el viento sople del mar a la tierra (medio día y tarde). (Carta, 2009, pág. 338)

Figura 3. **Brisa marina que se da al medio día y en la tarde**

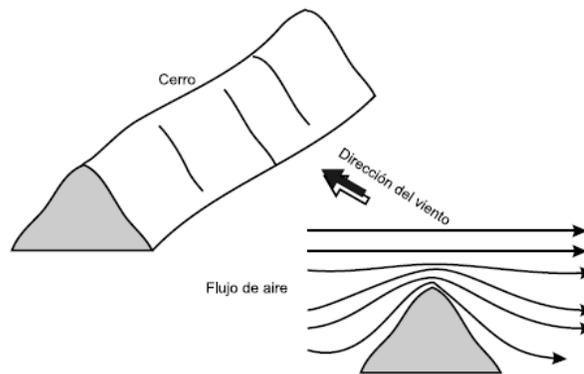


Fuente: (Carta, 2009, pág. 338).

Por la noche y al amanecer el viento sopla hacia el mar ya que la Tierra se enfría más rápidamente que el mar. Los vientos valle montaña se producen por un proceso parecido, unas laderas reciben más insolación que otras en función de su pendiente y orientación. Estos vientos soplan durante toda la noche desde la montaña al valle y desde el valle a la montaña durante el día

Por efecto del Teorema de Bernoulli se establece que el viento aumenta su intensidad al pasar sobre una montaña u obstáculo y sucede lo contrario o sea que disminuye esa intensidad cuando el viento pasa por un valle.

Figura 4. **Flujo del aire en el caso de un obstáculo montañoso**



Fuente: (Carta, 2009, pág. 340).

En conclusión, los vientos presentes en una región o zona están regidos o influenciados por las siguientes condiciones especiales de cada lugar:

- Situación geográfica del lugar
- Topografía del sitio
- Las irregularidades que pueda tener el lugar
- Climatología propia de la localidad.

## 1.2. **Potencial del viento**

Solamente un 2 % de la energía solar que llega a la tierra se convierte en energía eólica y en teoría los vientos distribuyen anualmente hasta un  $5 \times 10^4$  a la 5 kWh, que es una cantidad enorme de energía, pero solo una pequeña parte de la misma puede ser aprovechada, ya que se presenta en forma muy diluida

La energía máxima teórica que puede extraerse de una masa de aire en movimiento está dada por la siguiente expresión que es la ecuación de la energía cinética: (Carta, 2009, pág. 341)

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2$$

Donde:

$E_c$  = energía cinética (Joule/s)

$m$  = flujo de aire (kg/s)

$V$  = velocidad del viento (m/s)

Luego, se asume un área de captación  $A$  o sea el área de barrida de las palas y que está perpendicular a la dirección que pueda tener el viento, entonces el flujo de aire circulante que la atraviesa será:

$$m = \rho A V$$

Donde:

$A$  = área de captación ( $m^2$ )

$\rho$  = densidad del aire en kilogramos por metro cúbico ( $kg/m^3$ )

$V$  = velocidad del aire en metros por segundo (m/s).

Por lo tanto, la energía cinética teórica máxima por unidad de tiempo y de área ( $A = 1$ ) que se puede extraer de una masa de aire en movimiento será:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho V^3$$

Y a esta potencia se le denomina potencia meteorológica y sus dimensionales son  $W/m^2$ . (Moragues, J & Rapalini, A. 2003, pág. 6)

### 1.3. Límite de Betz

La potencia expresada por la expresión anterior ( $P_m$ ) no es la aprovechable completamente debido a que la velocidad del viento luego de atravesar la superficie de captación no es nula. Fue el científico Albert Betz (1885 – 1968) quien demostró que la máxima energía utilizable del viento con un aerogenerador ideal para convertirla en energía mecánica es igual a  $16/27$  (= 59259 %) de la energía total, con lo cual estableció los primeros principios que rigen hasta hoy la energía eólica.

Derivado de que Betz asume un rotor ideal, se deben considerar únicamente las variables:

- Densidad del aire.
- Superficie del rotor.
- Velocidad del viento.

Y por consiguiente el coeficiente de potencia máximo (o ideal) de una turbina eólica es:

$$P_{\text{útil}} = (16/27) (1/2) \rho A V^3 \quad \text{Ec. 2}$$

En esta ecuación para la potencia teórica extraída se muestra que la potencia se incrementa con el cuadrado del diámetro del rotor y con el cubo de la velocidad del viento. De esta forma al duplicar el diámetro del rotor, la

potencia se incrementa cuatro veces y si es la velocidad del viento la que se duplica, la potencia se multiplica por ocho. En conclusión y debido a esta relación, es deseable buscar los lugares donde los vientos presentan mayores velocidades.

#### **1.4. Medición del viento**

A continuación se describen las mediciones del viento.

##### **1.4.1. Medida de la velocidad del viento**

Existen aparatos especialmente diseñados con sensores para medir la magnitud de la velocidad del viento y estos son los denominados anemómetros de los que hay varias clases, pero los más conocidos y también más utilizados son los de rotación con cazoletas. La gran ventaja de estos anemómetros es que miden las dos componentes horizontales del viento, sin embargo, ya que su constante de tiempo varía inversamente proporcional a la misma velocidad, se aceleran más rápidamente que lo que se desaceleran y por tanto, sobreestiman la velocidad del viento. Otra causa de error del orden del 8 al 9 % es originada por la componente vertical de la velocidad del viento. (Carta, 2009, pág. 342)

Figura 5. **Anemómetro**



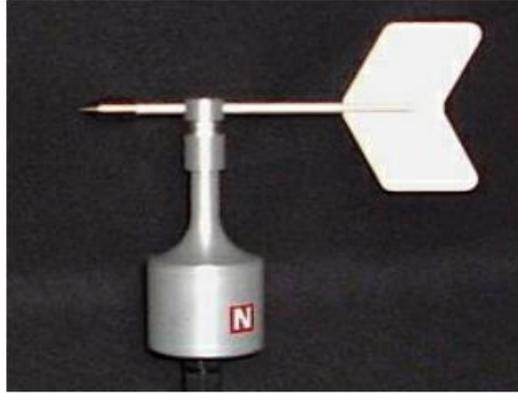
Fuente: (Carta, 2009, pág. 342).

Dado que los anemómetros son los aparatos utilizados para medir el viento, estos entregan una medición instantánea, por lo que algunos fenómenos como las ráfagas de viento desvirtúan esta medida si lo que se desea es tener una medida de velocidades medias. Por ello para conocer velocidades medias lo importante sería tener varias mediciones en intervalos de unos 10 minutos y tomar como medida válida el valor medio de todas las mediciones llevadas a cabo.

#### **1.4.2. Medida de la dirección del viento**

Para la medición de la dirección del viento se utiliza la veleta y ésta suele colocarse próxima a la ubicación del anemómetro. Tal y como ocurre con la velocidad del viento, la dirección suele sufrir muchas fluctuaciones, por lo que el sistema tiene que ser capaz de determinar una dirección media, la cual se obtiene promediando direcciones instantáneas de la dirección del viento que se toman con intervalos de minutos entre una y otra.

Figura 6. **Veleta**



Fuente: (Pérez, J. pág. 100).

### 1.5. **Caracterización energética del viento**

Para caracterizar el viento se ha utilizado la función de densidad de probabilidad de Weibull, permite modelar la distribución de la velocidad del viento, de tal forma que se puede predecir de forma bastante aproximada el comportamiento de la velocidad del viento en un lugar determinado y durante un período de tiempo definido.

Esta distribución de Weibull tiene la siguiente ecuación:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad \text{Ec. 3}$$

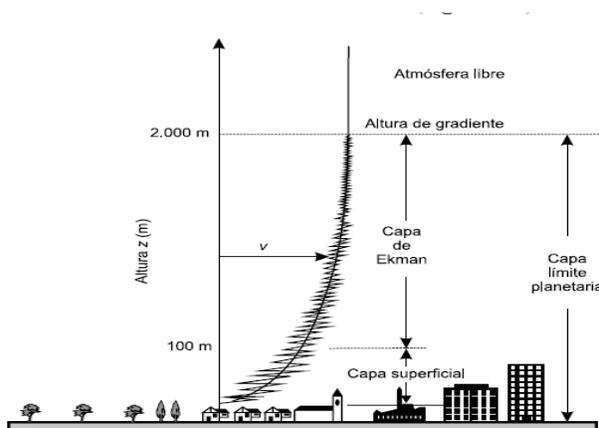
Donde  $k$  es el parámetro de forma, el cual es adimensional y  $c$  es el parámetro de escala que tiene las mismas dimensionales que las utilizadas para las velocidades del viento.

Pero más importante que establecer la caracterización energética del viento por medio de la distribución de Weibull es el tener una serie de aspectos que alteran estas características como son el relieve del terreno, la altura de ubicación de las turbinas eólicas y la influencia de los obstáculos que puedan encontrarse cerca.

### 1.5.1. Variación de la velocidad del viento con la altura

La velocidad del viento varía con la altura principalmente por las turbulencias de origen térmico, las cuales son causadas por el gradiente de temperatura del aire que provoca algunas corrientes en sentido vertical y a las irregularidades de la superficie del terreno.

Figura 7. **Capa límite atmosférica**



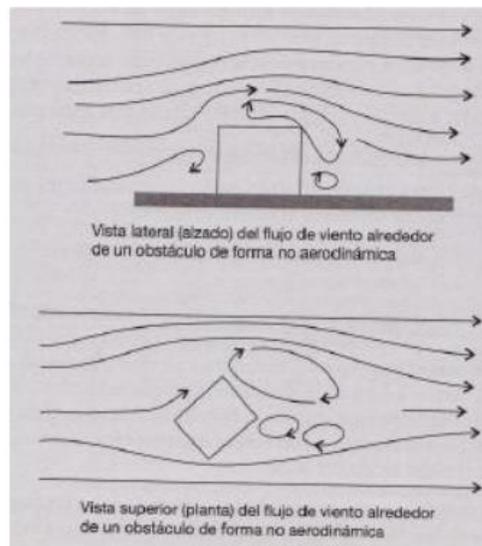
Fuente: (Carta, 2010, pág. 351).

### 1.5.2. Variación de la velocidad del viento con la existencia de obstáculos

Todos los obstáculos como edificios, árboles provocan una disminución en la velocidad del viento en forma horizontal, también un aumento en las turbulencias que no necesariamente tienen la misma dirección de las anteriores.

Por lo que esta situación es de tomar en cuenta negativamente para la instalación de grandes centrales eólicas, pero positivamente para la instalación de micro generadores o pequeños generadores eólicos, tal como puede apreciarse en la figura 8.

Figura 8. **Efecto de un obstáculo no aerodinámico sobre el flujo de viento**



Fuente: (Villarubia, M. 2004).

## **1.6. Clasificación de los aerogeneradores eléctricos**

El viento y específicamente su movimiento tienen una energía potencial que a través de una turbina puede hacer girar el eje rotacional del generador de energía eléctrica. Derivado de su tecnología de construcción, los aerogeneradores pueden dividirse en dos grandes grupos, que tienen su nombre de acuerdo con la posición del eje rotacional, así:

Aerogeneradores de eje vertical, que son los que tienen su eje de rotación que es perpendicular a la superficie terrestre por lo que pueden captar el viento de cualquier dirección, por lo que no necesitan un control de orientación y por lo tanto son de mayor sencillez, ya que sus operaciones de generación de energía se realizan en el suelo, lo que se traduce en una reducción de costos sobre todo en el montaje.

Aerogeneradores de eje horizontal, son los más comunes, dado que su eje de rotación es paralelo a la superficie terrestre y por ende, al movimiento de los vientos.

A su vez los aerogeneradores de eje vertical, que según el Cuaderno Técnico de Plantas Eólicas de ABB, representan solamente un 1 % del total se subdividen en aerogeneradores del tipo Savonius, aerogeneradores del tipo Darrieus y los aerogeneradores híbridos Savonius-Darrieus.

Los aerogeneradores de eje vertical tipo Savonius son el modelo más simple de aerogenerador y también se les denomina de resistencia, ya que constan de dos o cuatro chapas verticales, sin perfil de ala y curvadas en forma cilindro. Las principales características de los generadores Savonius según el mismo libro de ABB, son:

- Es un aerogenerador de velocidad lenta, la cual se define como de poca velocidad en el extremo de las palas.
- Utilizable con vientos de poca intensidad y en un rango limitado.
- Utilizado en aplicaciones de poca potencia.
- Poco ruidoso.

Figura 9. **Aerogenerador tipo Savonius**



Fuente: (Asea Brown Boveri, 2012).

Los aerogeneradores de eje vertical tipo Darrieus también se les denomina 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 eje en el par de rotación. Con relación a los Savonius proporcionan una mayor eficiencia al tener menos pérdidas por fricción. Sin embargo, este aerogenerador Darrieus es incapaz de arrancar por sí solo dado que, independientemente a la velocidad del viento, el par de arranque es nulo: como consecuencia este aerogenerador necesita un dispositivo auxiliar de arranque. (Asea Brown Boveri, 2012)

Las principales características del aerogenerador Darrieus son:

- Es un aerogenerador rápido.
- Adaptación a los cambios de dirección del viento.
- Eficiente para vientos con una notable componente vertical de la velocidad (emplazamientos con pendientes o instalaciones en las terrazas de los edificios, efecto esquina).
- Utilizable con vientos de poca intensidad y en un rango limitado.
- Utilizable para aplicaciones de gran potencia.
- Poco ruidoso y con vibraciones que se limitan a la cimentación (apto por tanto para instalaciones sobre edificios).
- El generador y su multiplicador pueden ubicarse a nivel del suelo.

Figura 10. **Aerogenerador tipo Darrieus**



Fuente: (Asea Brown Boveri, 2012).

En el aerogenerador híbrido Darrieus-Savonius, el par de arranque lo aporta el aerogenerador coaxial Savonius situado en el interior del aerogenerador Darrieus, como se observa en la siguiente figura:

Figura 11. **Aerogenerador híbrido Darrieus-Savonius**



Fuente: (Asea Brown Boveri, 2012).

Los aerogeneradores también se pueden clasificar de acuerdo con sus potencias nominales de generación:

#### **1.6.1. Microturbinas eólicas (potencias menores a 3 kW)**

Estos aerogeneradores se instalan para pequeños consumidores de energía como por ejemplo, sistemas aislados como viviendas, sitios de telecomunicaciones celulares, entre otros.

Este posee un generador eléctrico que es de imanes permanentes y se acciona directamente por la turbina eólica sin que haya una caja multiplicadora de velocidad entre el eje del rotor del aerogenerador y el generador eléctrico.

Las microturbinas son generadores eólicos rápidos y generalmente de eje horizontal que comúnmente tienen tres aspas. El diámetro total de estas turbinas es pequeño, alrededor de 1 a 5 metros, trabajando a velocidad de rotación bastante elevada y generalmente sin un control constante de velocidad, por lo que la electricidad que generan en forma alterna y de frecuencia variable es rectificadora para ser almacenada en bancos de baterías, de donde posteriormente se procesa para ser convertida nuevamente de corriente continua a corriente alterna con una frecuencia constante.

### **1.6.2. Pequeños aerogeneradores (potencias < 50 KW)**

Estos tienen principalmente aplicaciones en centros comerciales, universidades o bien parques eólicos a pequeña escala. También son utilizados por pequeños consumidores de energía igualmente que los anteriores, pero con rangos de mayor potencia. Algunos de estas aplicaciones combinan la energía eólica, con algún otro tipo de energía como lo son paneles solares fotovoltaicos, generadores diésel o interconectados con la red eléctrica existente.

### **1.6.3. Grandes generadores eólicos (potencias 1 a 5 Mw)**

Los grandes aerogeneradores se han convertido en equipos que cada vez puedan ser más familiares en los paisajes rurales, ubicados por lo general en sitios remotos, alejados de las zonas urbanas. No es de extrañar el ver uno o varios aerogeneradores en campos abiertos, como por ejemplo el caso de la planta de generación San Antonio El Sitio, ubicada en la aldea Los Llanos, del municipio de Villa Canales en el Depto. de Guatemala y la cual puede ser visualizada aproximadamente en el km. 34 de la carretera a El Salvador.

Estos tipos de generadores tienen la función de producir electricidad para ser interconectada con la red eléctrica nacional. Son generadores que poseen diámetros en el rango de unos 60 a 80 m. y una altura del centro de giro del rotor (buje) entre 60 y 100 m. Estas son grandes máquinas que han iniciado su introducción hacia el 2000 y particularmente en instalaciones marinas. Presentan un factor a su favor de la economía a escala.

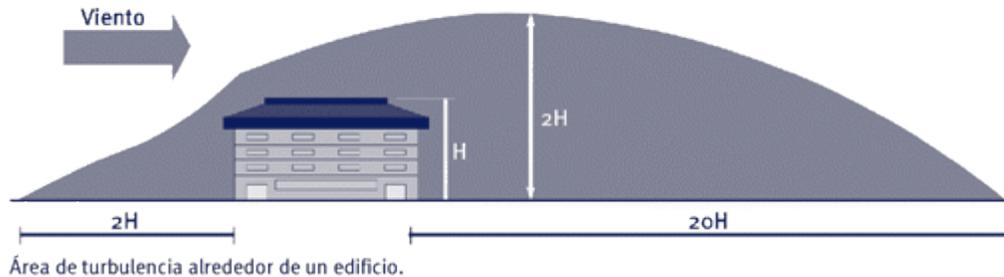
Sin embargo, en las áreas urbanas esto no es común, a pesar de que los espacios ciudadanos también ofrecen oportunidades para los pequeños aerogeneradores debidamente diseñados con este fin. Recientes estudios han mostrado que hay un potencial significativo para generar energía eólica dentro de los ambientes urbanos.

El término urbano se refiere a todas aquellas áreas con construcciones, áreas industriales, ciudades, áreas densamente pobladas con muchos edificios, o áreas en la cual la densidad de edificaciones crea comportamientos del viento complejos. (Moreno, F. pág. 240)

La instalación de las turbinas de pequeña escala en los edificios o bien en el perímetro urbano se puede clasificar en tres partes:

- Turbinas eólicas integradas a los nuevos edificios. En este caso las mismas forman parte del diseño del inmueble por lo que pueden ser de varios centenares de kW. Derivado de lo anterior todavía existen muy pocas experiencias.
- Turbinas eólicas montadas en edificios existentes. Estas tienen limitado su potencial de producir energía debido a la existencia de turbulencias, por lo que se pueden emplear varias turbinas de hasta 5 kW cada una.

Figura 12. **Área de turbulencia sobre un edificio**



Fuente: (MORENO F. pág. 240).

- Turbinas eólicas en espacios públicos, conocidas también como modelos residenciales. Consisten en aerogeneradores pequeños instalados sobre el suelo con edificaciones cercanas en zonas totalmente residenciales, agrícolas o ganaderas e industriales. Se emplean turbinas de hasta 100 kW por lo que es la variante más utilizada actualmente.

### 1.7. **Contador tipo bidireccional**

El balance neto o medición neta de electricidad es un esquema de utilidad general para el uso y pago del recurso, en el cual un cliente que genera su propia electricidad puede compensar los saldos de energía de manera instantánea o diferida, permitiendo a los consumidores la producción individual de energía para su propio consumo, tratando de igualar su curva de producción con su curva de demanda.

Este sistema es utilizado generalmente por consumidores que poseen una pequeña instalación de energías renovables (eólica o fotovoltaica principalmente), y permite devolver a la red eléctrica el exceso producido por un

sistema de autoconsumo con la finalidad de poder hacer uso de ese exceso en otro momento. De esta forma, la compañía eléctrica que proporcione la electricidad cuando la demanda sea superior a la producción del sistema de autoconsumo, descontará en el consumo de la red de la factura, los excesos entregados a la misma, el cual se realiza mediante un contador bidireccional que permite medir la electricidad en ambos sentidos, la consumida y la vertida a la red. Esto permite hacer uso de la electricidad producida en exceso, por ejemplo, en vacaciones, por un sistema de autoconsumo fotovoltaico.

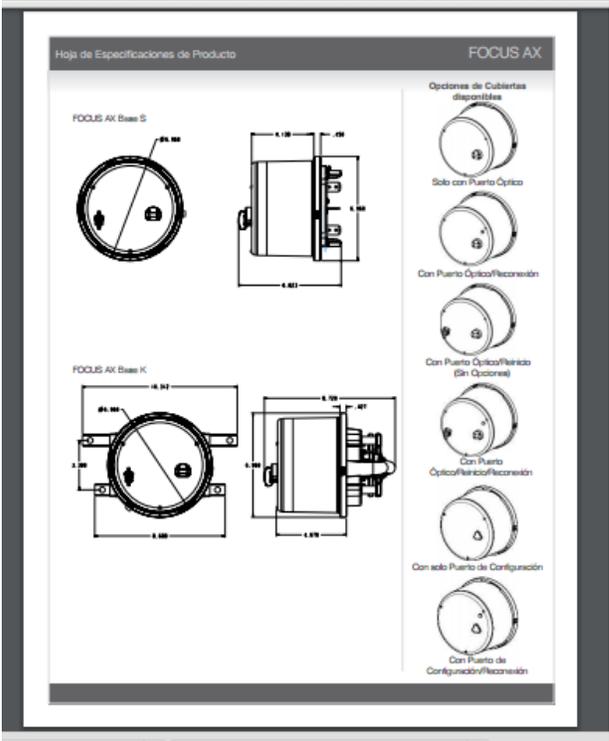
En los últimos años, debido al creciente auge de pequeñas instalaciones de energía renovable, el autoconsumo con este tipo de balance neto ha comenzado a ser regulado en Guatemala, donde se dispone desde el 2008 de una normativa de medición neta, que permite entregar excedentes de generación fotovoltaica a la red, y que ha dado posibilidad de la conexión de casi un ciento de KW de origen fotovoltaicos a la red.

Figura 13. **Contador bidireccional con su marca color verde**



Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Esquema de conexiones de un contador de energía eléctrica del tipo bidireccional



Fuente: Focus.

## **2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **2.1. Situación actual**

Como se mencionó en el planteamiento del problema en el campus central zona 12 de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se tiene en general un alto consumo de energía eléctrica en las instalaciones de todas y cada una de las unidades académicas. Esto conlleva a una elevada facturación por concepto de consumo de energía eléctrica, que disminuye las oportunidades de inversión en otros aspectos como lo son infraestructura de nuevas y actuales instalaciones, información en bibliotecas, entre otros. Esta electricidad de acuerdo con lo anterior puede venir de diferentes fuentes de generación y la gran mayoría de ellas no renovables al precio de las renovables. Pero eso puede aliviarse al contar con una fuente de generación propia y renovable que compense la facturación actual.

### **2.2. Aprovechamiento de la energía eólica**

Los edificios de la Facultad de Ingeniería en el campus de la z. 12 de la Universidad de San Carlos de Guatemala son el T1 (compartido), T3, T4, T5, T6, T7 y S11.

**Figura 15. Fotografía de la ubicación de la Facultad de Ingeniería dentro del campus central de la zona 12 de la Universidad de San Carlos de Guatemala**



Fuente: Google Earth.

Para conocer el impacto de la implementación del aprovechamiento de la energía eólica, se estableció primeramente cuales son los edificios que cumplen con los siguientes requisitos:

- Estar alimentado de la red de energía eléctrica por un único contador de energía propiedad de la empresa distribuidora.
- Ser un edificio que no está compartido con otras unidades académicas de la universidad.

Luego de la información obtenida en el Departamento de Servicios Generales de la USAC, se estableció que el edificio que cumple con las anteriores características es el edificio T3.

Con esta especificación del edificio a estudiar, se solicitaron al mismo Departamento de Servicios Generales de la Dirección General de Administración de la USAC, los consumos de energía eléctrica históricos de por lo menos los últimos doce meses del edificio T3 de la Facultad de Ingeniería.

Se definieron por medio de mediciones en el campo cuales son los comportamientos de potencial eólico durante el transcurso del día, debido a que es durante las horas hábiles del día cuando se utiliza en mayor proporción la energía eléctrica en los edificios.

También se obtuvieron en la Secretaría Adjunta de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, los permisos necesarios para la investigación de campo que incluyeron las visitas necesarias a la terraza del edificio T-3.

### **2.3. Mediciones de potencial eólico**

Para ello se utilizó un anemómetro portátil de la marca La Crosse Technology EA-3010U, con las siguientes características técnicas:

- Velocidades instantáneas máxima y media del viento.
- Muestra en pantalla las velocidades en km/h o en m/s.
- Gráfico de barras de escala de Beaufort (0-12).
- Temperatura en grados Fahrenheit o Celsius.
- Utiliza para su funcionamiento una pila de litio de 3V.

Figura 16. Fotos de las mediciones de potencial eólico



Anemómetro Digital LA CROSSE  
Con lectura de 7.0 m/h (3.11 m/s)



Temperatura a las 17:00 hrs de  
74.4° Fahrenheit (23.55° Celsius)



Lectura velocidad a las 20:00 hrs.  
De 9.4 m/h (4.17 m/s)



Lectura de temperatura a las 20:00 hrs.  
de 72.0 ° Fahrenheit (22.22° Celsius)

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presentan las variables que fueron medidas.

### **2.3.1. Definición de variables**

- Velocidad del viento en metros por segundo y lo recomendable fue obtener datos cada 30 minutos por medio de un anemómetro digital.
- Desviación estándar del anterior parámetro de velocidad del viento.
- Velocidades máximas y mínimas del viento durante el tiempo medido.
- Temperatura ambiente en °C.

### **2.3.2. Mediciones**

- Para las de velocidad del viento, se utilizó un anemómetro digital que se ubicó en la terraza del edificio T-3 de la Facultad de Ingeniería.
- Además de realizar las mediciones se buscaron datos actuales e históricos de velocidades de viento que pudiera proporcionar el INSIVUMEH, pero esto no fue posible, dado que no se tenía dicha información.
- Para las temperaturas se aplicó la metodología mencionada en el inciso i

Ecuaciones del potencial eólico a utilizar en este trabajo:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\frac{v}{c}\right]^k$$



### 3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1. Los resultados de la medición del viento se muestran a continuación

Se tomaron las lecturas descritas en la tabla I con el anemómetro portátil EA-3010U, con un intervalo de 30 minutos entre cada medición y durante un lapso de 14 horas de aprovechamiento de la luz del sol, durante la noche se carece de total iluminación en el lugar.

Tabla I. **Medición del viento**

DOM. 7 DE MAYO

	Hora	Km/h	m/s	° F	° C
1	07:00:00	8,05	2,22	73	22,78
2	07:30:00	9,01	2,49	73,6	23,11
3	08:00:00	10,78	2,98	74,8	23,78
4	08:30:00	6,44	1,78	75,4	24,11
5	09:00:00	12,35	3,47	75,6	24,22
6	09:30:00	9,66	2,67	75,4	24,11
7	10:00:00	6,44	1,78	78,1	25,61
8	10:30:00	6,12	1,69	77	25
9	11:00:00	7,89	2,18	79,85	26,58
10	11:30:00	10,78	2,98	77,5	25,28
11	12:00:00	14,32	3,96	78,6	25,89
12	12:30:00	9,01	2,49	79,8	26,56
13	13:00:00	9,81	2,71	79,6	26,44
14	13:30:00	13,04	3,6	79,4	26,33
15	14:00:00	9,17	2,53	79,6	26,44
16	14:30:00	1,61	0,44	82	27,78
17	15:00:00	8,05	2,22	80,8	27,11
18	15:30:00	8,37	2,31	82,8	28,22
19	16:00:00	6,44	1,78	81,3	27,39
20	16:30:00	7,89	2,18	80,3	26,83
21	17:00:00	11,90	3,29	77	25

Continuación de la tabla I.

22	17:30:00	13,36	3,69	78	25,56
23	18:00:00	17,22	4,76	76	24,44
24	18:30:00	16,09	4,44	74	23,33
25	19:00:00	14,48	4	72	22,22
26	19:30:00	10,3	2,84	73,2	22,89
27	20:00:00	11,59	3,2	72,1	22,28
28	20:30:00	13,36	3,69	70	21,11
29	21:00:00	13,84	3,82	68,1	20,06

Fuente: elaboración propia.

De igual manera, se realizaron las mismas mediciones que el día anterior las que se muestran en la tabla II.

Tabla II. **Medición del viento día 2**

DIA LUNES 8 MAYO

	Hora	Km/h	m/s	° F	° C
1	7:00:00	8,69	2,40	73,20	22,89
2	7:30:00	10,30	2,84	74,60	23,67
3	8:00:00	8,37	2,31	75,00	23,89
4	8:30:00	16,58	4,58	75,60	24,22
5	9:00:00	13,84	3,82	75,80	24,33
6	9:30:00	13,68	3,78	75,60	24,22
7	10:00:00	7,56	2,09	78,30	25,72
8	10:30:00	24,94	6,89	77,20	25,11
9	11:00:00	5,63	1,56	79,90	26,61
10	11:30:00	12,23	3,38	77,40	25,22
11	12:00:00	7,24	2,00	78,80	26,00
12	12:30:00	7,72	2,13	79,60	26,44
13	13:00:00	3,54	0,98	79,70	26,50
14	13:30:00	6,11	1,69	79,60	26,44
15	14:00:00	6,60	1,82	79,70	26,50
16	14:30:00	8,37	2,31	82,10	27,83
17	15:00:00	12,39	3,42	81,00	27,22
18	15:30:00	8,37	2,31	82,60	28,11

Continuación de la tabla II.

19	16:00:00	12,07	3,33	81,40	27,44
20	16:30:00	13,52	3,73	80,50	26,94
21	17:00:00	9,17	2,53	77,60	25,33
22	17:30:00	13,52	3,73	78,30	25,72
23	18:00:00	7,08	1,96	76,10	24,50
24	18:30:00	8,53	2,36	74,20	23,44
25	19:00:00	11,27	3,11	72,10	22,28
26	19:30:00	14,16	3,91	73,10	22,83
27	20:00:00	15,13	4,18	72,00	22,22
28	20:30:00	10,62	2,93	70,50	21,39
29	21:00:00	9,66	2,67	68,00	20,00

Fuente: elaboración propia.

También es importante conocer los rangos de vientos ya establecidos, y que se muestran en la figura 17.

Figura 17. **Escala de velocidades de viento**

ESCALA DE BEAUFORT		
Grado	Vel. Km/h	Descripcion
0	1	calma
1	1 - 5	ligero
2	6 - 11	
3	12 - 19	
4	20 - 28	moderado
5	29 - 38	fresco
6	39 - 49	fuerte
7	50 - 61	
8	62 - 74	Temporal
9	75 - 88	
10	89 - 102	Borrasca
11	103 - 117	
12	118 - 120	Huracán

Fuente: (Ledesma, J. 2010)..



## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

Se hicieron las mediciones de velocidad de viento con un anemómetro digital y durante dos días en la azotea del edificio T3. Con ello se demostró que de acuerdo con los resultados obtenidos, las velocidades de viento medidas en el lugar son las presentadas y que en los que se muestra que:

### 4.1. Densidad de la potencia eólica

La densidad de la potencia eólica es la potencia eléctrica por unidad de área, esta es la potencia producida dependiendo de la velocidad y densidad del viento. La siguiente ecuación describe el fenómeno.

$$D.E. = \frac{1}{2} \rho v^3 W/m^2$$

Donde, la densidad del aire  $\rho$  es aproximadamente  $1,225 \frac{kg}{m^3}$ ,  $v$  es la velocidad del viento y D.E. es la densidad de potencia eólica. Este factor fue utilizado para determinar las constantes lambda y k del modelo estadístico de Weibull para los datos.

De acuerdo con la ecuación de la Densidad de Potencia Eólica para el primer día de mediciones tenemos:

Promedio de densidad de potencia eólica	$18,43 \frac{W}{m^2}$
--	-----------------------

Y en el segundo día de mediciones se obtuvo:

Promedio de densidad de potencia eólica  $23,49 \text{ W/m}^2$

Luego, con los datos tabulados después del primer día de mediciones se ha realizado la siguiente gráfica de la figura 18 e inferido los parámetros estadísticos mostrados en la tabla III:

Figura 18. **Gráfica día 1**



Fuente: elaboración propia.

Tabla III. Principales parámetros estadísticos día 1

Media	2,83 $\frac{m}{s}$
Mediana	2,71 $\frac{m}{s}$
Moda	1,78 $\frac{m}{s}$
Desviación	0,95 $\frac{m}{s}$
Varianza	0,90 $\frac{m}{s}$
Sesgo	-0,12

Fuente: elaboración propia.

Coeficiente de correlación velocidad/tiempo = 0,44

El coeficiente de correlación es positivo, lo que quiere decir que existe bastante relación entre el número de mediciones efectuadas durante el lapso de tiempo versus la velocidad del viento, ya que éste se incrementa también. En este caso, la correlación es aproximadamente de un 44,5 %.

Con los datos obtenidos el segundo día, se realizó también el mismo análisis y se presenta la figura 19:

Figura 19. **Gráfica día 2**



Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Principales parámetros estadísticos día 2**

Media	$2,92 \frac{m}{s}$
Mediana	$2,67 \frac{m}{s}$
Moda	$2,31 \frac{m}{s}$
Desviación	$1,16 \frac{m}{s}$
Varianza	$1,36 \frac{m}{s}$
Sesgo	1,35

Fuente: elaboración propia.

Coeficiente de correlación velocidad/tiempo -0,015

Correlación ligeramente negativa. La correlación negativa indica que las dos variables se relacionan en sentido inverso. En otras palabras, como puede observarse en el coeficiente, no hay casi nada de relación entre ambas variables al ser solamente de un 1,5 %.

#### 4.2. Modelo probabilístico de Weibull

Con los datos de 2 días de viento, se ha realizado una aproximación del modelo, teniendo en cuenta las constantes de forma de este. Este modelo proporciona la probabilidad que el viento tenga una determinada velocidad.

A continuación se muestran las probabilidades entre 0 m/s y 10 m/s, donde la suma de todas las probabilidades es igual a 1.

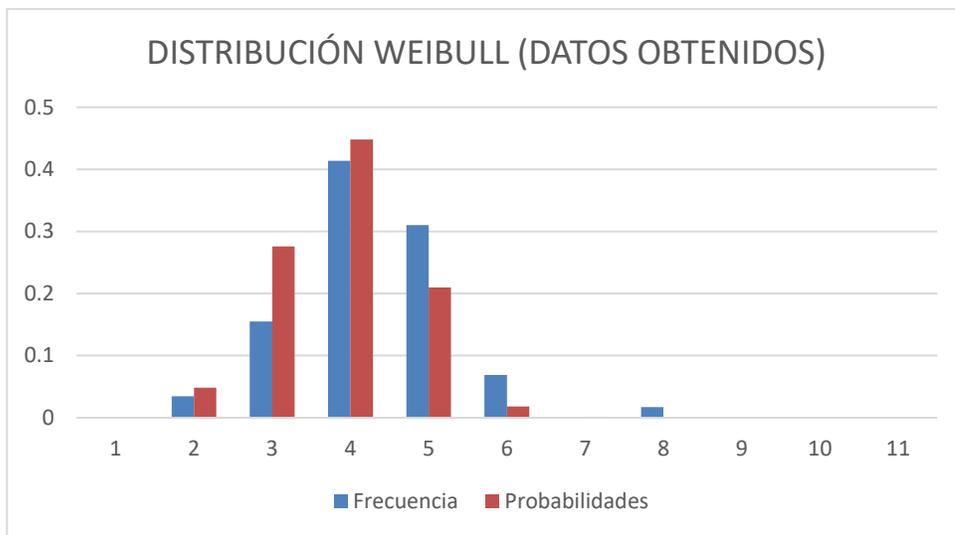
Tabla V. Modelo probabilístico de Weibull

Clase $\frac{m}{s}$	Probabilidad
0	0,00
1	0,05
2	0,28
3	0,45
4	0,21
5	0,02
6	0,00
7	5,74E-08
8	3,81E-13
9	1,62E-20
10	1,44E-30
	<b>1,00</b>

Fuente: elaboración propia.

Se muestra a continuación la gráfica de barras de la comparación entre la frecuencia de los valores de velocidades (barra color azul) versus la probabilidad de ocurrencia (barra azul) que nos proporciona la aplicación del modelo de Weibull.

Figura 20. **Distribución Weibull (datos obtenidos)**



Fuente: elaboración propia.

Por último, se muestra la función de probabilidad para el fenómeno completo del viento, con los datos tomados durante dos días en la Facultad de Ingeniería de la USAC:

$$P(v) = 1,174 \left( \frac{v}{3,1840} \right)^{2,73} e^{-\left( \frac{v}{3,1840} \right)^{3,73}}$$

## 5. PRESUPUESTO Y EVALUACIÓN FINANCIERA

El costo de cada uno de los aerogeneradores propuestos está alrededor de los \$1000,00, moneda de los Estados Unidos de América. Este valor incluye también la mano de obra así como de los materiales de instalación de cada uno.

Figura 21. **Turbina de eje vertical de 300/500 watts (Solarstore)**



Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, las medidas de la terraza del edificio T3 son: longitud de 90 m y un ancho de 25 m, para no tener ningún efecto adverso en la producción de energía, se calculó instalarlas en una sola línea al frente de la fachada del edificio y sobre la terraza.

De acuerdo con el espacio que debe existir entre ejes de las turbinas según especificaciones del fabricante, este espacio debiera ser de 2.5 metros entre ejes, por lo que, para la longitud de 90 metros, la cantidad a instalar sería de 34 turbinas de eje vertical.

Tabla VI. **Tabla comparativa de inversión en la instalación de los aerogeneradores vrs ahorro en el pago de la factura de energía eléctrica (Tasa de cambio: Q7,40 x \$1,00)**

DESCRIPCIÓN EQUIPO	CANTIDAD (Unid.)	POTENCIA C/U	POTENCIA TOTAL	COSTO UNITARIO	VALOR TOTAL (\$)	VALOR TOTAL (Q)
AEROGEN.	34	500 WATT	17 KW	US \$1000	\$34 000	Q251 600
					<b>TOTAL:</b>	<b>Q251 600</b>
DESCRIPCIÓN EQUIPO	CANTIDAD (Unid.)	POTENCIA UNITARIA	POTENCIA TOTAL	HORAS/DIA EN USO	KWH/DIA Generado	KWH/MES Generados
AEROGEN.	34	0,5 KW	17 KW	24	408	12,240
<b>Consumo promedio mensual edificio T3 en kwh:</b>				33 546,15		
<b>Factura promedio mensual edificio T3:</b>				Q27 209.18		
<b>Costo promedio kwh/hora de factura pagada:</b>				Q 0,811		
<b>AHORRO MENSUAL (Kwh/mes):</b>						
<b>33 546,15 - 12,240 = 21236.15 Kwh/M</b>						
<b>AHORRO MENSUAL EN QUETZALES POR EL AHORRO EN CONSUMO EN KWH:</b>						
<b>12 240,00 * Q 0,811 = Q9 926,00 (\$ 1341,00)</b>						
<b>AHORRO MENSUAL EN % = 36 %</b>						

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Análisis costo/beneficio de la inversión**

<b>ANÁLISIS COSTO/BENEFICIO DE LA INVERSIÓN</b>		(Q)
Monto del préstamo inicial	251.600,00	595.598,40
Tasa de interés	15,00 %	506.057,47
Factura mensual (Q)	27 209,18	89.540,93
Generación de energía	12 240 kwh/mes	
Ahorro mensual (Q)	9.926,64	
Ahorro anual (Q)	119119,68	
Ahorro a 5 años (Q)	595598,4	
<p>Analizando para 5 años y considerando que la deuda tenga un 15 % de interés, el ahorro producido por los aerogeneradores es mucho mayor del costo de los mismos.</p>		
<p><b>Ahorro a 5 años (Q)</b></p> <p>Si la deuda fuera a 5 años su valor futuro sería</p> <p>Diferencia</p>		
<p>La Tasa Interna de Retorno (TIR) es la tasa de interés o rentabilidad que ofrece una inversión. Es decir, es el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá una inversión para las cantidades que no se han retirado del proyecto.</p> <p>El criterio de selección será el siguiente donde "k" es la tasa de descuento de flujos elegida para el cálculo del VAN:</p> <p><b>Si <math>TIR &gt; k</math>, el proyecto de inversión será aceptado.</b> En este caso, la tasa de rendimiento interno que obtenemos es superior a la tasa mínima de rentabilidad exigida a la inversión.</p> <p><b>En este proyecto, <math>31.52\% &gt; 15\%</math>, por lo que el proyecto SI debiera de realizarse.</b></p>		
<b>CÁLCULO DEL TIR</b>		
Inversión inicial	-251.600,00	
Ahorro año 1	119.119,68	
Ahorro año 2	119.119,68	
Ahorro año 3	119.119,68	
Ahorro año 4	119.119,68	
Ahorro año 5	119.119,68	
<b>TASA INTERNA DE RETORNO</b>	<b>31,52 %</b>	

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. Comparativo de inversión contra ahorro de pago por consumo eléctrico

COMPARATIVO DE INVERSIÓN CONTRA AHORRO DE PAGO POR CONSUMO ELÉCTRICO											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AÑO	FLUJO DE FONDOS										
Precio de potencia eléctrica generada	Q0,00	Q119 119,68	Q122 097,70	Q125 150,10	Q128 278,90	Q131 485,90	Q134 773,00	Q138 142,30	Q141 595,90	Q145 135,80	Q148 764,20
Costos fijos	Q0,00	Q12 580,00									
Costos variables	Q0,00	Q12 580,00	Q12 894,50	Q13 216,90	Q13 547,30	Q13 886,00	Q14 233,20	Q14 589,00	Q14 953,70	Q15 327,50	Q15 710,70
Ahorros variables	Q0,00	Q83 959,68	Q86 623,20	Q89 353,20	Q102 151,60	Q105 019,90	Q107 959,80	Q110 973,30	Q114 062,20	Q117 228,30	Q120 473,50
Impuestos	Q0,00	Q9 395,97	Q9 662,32	Q9 935,32	Q10 215,16	Q10 501,99	Q10 795,98	Q11 097,33	Q11 406,22	Q11 722,83	Q12 047,35
Ahorros netos	Q0,00	Q84 563,71	Q86 960,88	Q89 417,88	Q91 936,44	Q94 517,91	Q97 163,82	Q99 875,97	Q102 655,98	Q105 505,47	Q108 426,15
Valor de rescate	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q5 032,00
Inversión	Q251 600,00	Q0,00									
Total de ahorro	Q0,00	Q119 119,68	Q122 097,70	Q125 150,10	Q128 278,90	Q131 485,90	Q134 773,00	Q138 142,30	Q141 595,90	Q145 135,80	Q153 796,20
Total de egresos	Q251 600,00	Q34 555,97	Q35 136,82	Q35 732,22	Q36 342,46	Q36 967,99	Q37 609,18	Q38 266,33	Q38 939,92	Q39 630,33	Q40 338,05
Flujo neto de fondos	-Q251 600,00	Q84 563,71	Q86 960,88	Q89 417,88	Q91 936,44	Q94 517,91	Q97 163,82	Q99 875,97	Q102 655,98	Q105 505,47	Q113 458,15
		VPN	Q714 456,23								
		TIR	34,10 %								

Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

1. Si es posible la generación de energía eléctrica utilizando la energía eólica y se puede aplicar en los edificios de la Facultad de Ingeniería del campus central de la Universidad de San Carlos de la zona 12 de la ciudad de Guatemala, específicamente en el edificio T3. Esta se basa en que las turbinas propuestas inician su arranque desde velocidades del viento de 2 m/s, la cual es una velocidad que se supera con los datos obtenidos en las mediciones realizadas y las que según las tablas tienen un mínimo de 0,44 m/s y un máximo de 6,89 m/s entre ambos días, lo cual encaja en el rango de los vientos ligeros.
2. El gasto en quetzales pagado a la empresa distribuidora de electricidad, por concepto de consumo de energía eléctrica solamente en el edificio T3, se estableció que las facturas del contador de energía eléctrica de este edificio, asciende a la cantidad promedio mensual de Q27 210,00.
3. Al realizar la medición del viento, se determinó que, con las velocidades obtenidas, la mejor ubicación de los equipos de generación eólica en el edificio T3 de la Facultad de Ingeniería, debe ser en la parte del lado norte de dicho edificio.
4. La turbina eólica que más se adecúa para el presente proyecto, que también está disponible en el mercado para la generación eólica y que puede ser utilizada en el edificio T3 de FIUSAC, de acuerdo con los valores de medición de viento es la turbina de eje vertical de 500 vatios.
5. Se realizó una proyección del ahorro en la factura eléctrica con la

aplicación de este proyecto eólico, dando un ahorro del 36 % en el pago de energía eléctrica a la empresa distribuidora de electricidad.

6. Se evaluó la factibilidad económica de estas tecnologías y los consecuentes indicadores financieros, por lo que el retorno de la inversión se daría en un período corto de tiempo y posteriormente el total del ahorro podría ser utilizado en otros aspectos de inversión educativa en la universidad.

## RECOMENDACIONES

1. Es necesario implementar en la totalidad de los edificios de las diferentes unidades de la Universidad de San Carlos de Guatemala, el uso de fuentes naturales renovables para la generación de energía eléctrica de menor costo.
2. Sería recomendable que, con el ahorro económico proyectado por concepto del menor gasto en el pago de la factura eléctrica, se puedan presupuestar mayores cantidades para la mejora en rubros académicos inicialmente en la Facultad de Ingeniería y posteriormente en toda la universidad.
3. Es necesario mantener un monitoreo constante de los principales datos meteorológicos en el área del campus de la universidad, como por ejemplo velocidad y dirección del viento, temperatura, presión atmosférica, radiación solar, entre otros. De esta forma se pueden obtener las bases de estudio para la instalación de más y mejores fuentes alternas naturales de generación eléctrica que permitan canalizar de mejor forma los recursos financieros hacia los procesos de enseñanza aprendizaje en la educación superior universitaria.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Asea Brown Boveri, S. (2012). *Cuaderno de Aplicaciones Técnicas No. 12 Plantas Eólicas*. México: ABB.
2. CARTA, J. A. (2009). *Centrales de Energía Renovables*. Madrid: Prentice Hall.
3. Comisión Nacional de Energía Eléctrica, CNEE . (2013). *Informe Estadístico de Mercado* . Guatemala: Serviprensa.
4. Congreso. (octubre de 2003). Decreto Núm. 52-2003. *Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable*. Guatemala.
5. Dazne, A. (2011). *610 V: turbina urbana de eje vertical*. Arquitectura Prefab.
6. DGE, M. (2014). *Resultado de las mediciones de viento a partir del año 2006 hasta el 2014*. Guatemala: Ministerio de Energía y Minas.
7. (s.f.). *E-7 Energía Eólica Integrada en Edificios* . Junta de Castilla y León.
8. Figueredo, C. M. (s.f.). *Energía Eólica en Zonas Urbanas*. Cuba.
9. FOCUS. (s.f.). Hoja de especificaciones de producto Focus AX.

10. Girón, M. J. (2005). *Una Aproximación al marco jurídico que incentive el desarrollo de proyectos de energía renovable*. USAC, Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales.
11. GoogleMaps. (s.f.). Recuperado el 30 de abril de 2016, de <https://www.google.com.gt/maps/@14.587703,-90.5536455,70m/data=!3m1!1e3?hl=es>. Consulta: 10 de octubre 2018.
12. Hernández-Escobedo, Q., Espinosa-Arenal, F., Saldaña-Flores, R. Rivera-Blanco, C. (2011). *Evaluación del potencial eólico para la generación de energía eléctrica en el estado de Veracruz, México*. Veracruz, México.
13. International Energy Agency . (2008). *World Energy Outlook*. Paris, FRANCIA: IEA.
14. Lassig, J., Palese, C., Valle Sosa, J., Jara, U., Mazzei, S. (2010). *Aprovechamientos eólicos para el edificio de la Facultad de Ingeniería de la U.N. del Comahue*. Argentina.
15. Ledesma, J. (2010). *Climatología y Meteorología Agrícola*. Editorial Paraninfo, España.
16. MATTIO, H. F., Tilca, F. (Octubre 2009). *Recomendaciones para mediciones y velocidad de viento con fines de generación eléctrica y medición de potencia eléctrica generada por aerogeneradores*. Argentina.

17. Ministerio de Energía y Minas, MEM. (2010). *ENERGÍAS RENOVABLES*. Guatemala: MEM.
18. Moragues, J. y Rapalini, A. (2003). *ENERGÍA EÓLICA*. ARGENTINA: INTITUTO ARGENTINO DE LA ENERGÍA.
19. Moreno Figueredo, C. (2010). *Energía Eólica en Zonas Urbanas*. Cuba: CETER Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables.
20. *Norma IEC 61400-12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines*. (2005).
21. Villarubia, M. (2004). *Energía Eólica*. Barcelona, España: Aleph, servicios editoriales.

