



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DE GENERACIÓN EÓLICA PARA LA  
OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN UNA TORRE DE  
TELECOMUNICACIONES EN LA ALDEA SANTA ELENA BARILLAS, VILLA CANALES**

**Alvaro Antonio Orellana Leal**

Asesorado por el Msc. Ing. Hugo Geovany Sánchez Ochoa

Guatemala, agosto de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DE GENERACIÓN EÓLICA PARA LA  
OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN UNA TORRE DE  
TELECOMUNICACIONES EN LA ALDEA SANTA ELENA BARILLAS, VILLA CANALES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ALVARO ANTONIO ORELLANA LEAL**

ASESORADO POR EL MSC. ING. HUGO GEOVANY SÁNCHEZ OCHOA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Córdova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Jorge Mario Morales González
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
EXAMINADOR	Ing. Edgar Florencio Montufar Urizar
EXAMINADOR	Ing. Ingrid Salomé Rodríguez de Loukota
SECRETARIO	Ing. Edgar Aurelio Bravatti Castro

## **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 DEL ANÁLISIS DE GENERACIÓN EÓLICA PARA LA  
OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN UNA TORRE DE  
TELECOMUNICACIONES EN LA ALDEA SANTA ELENA BARILLAS, VILLA CANALES**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 19 de febrero de 2022.

**Alvaro Antonio Orellana Leal**



**EEPFI-PP-0778-2022**

Guatemala, 20 de junio de 2022

**Director**  
**Armando Alonso Rivera Carrillo**  
**Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica**  
**Presente.**

**Estimado Ing. Rivera**

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN ANÁLISIS DE GENERACIÓN EÓLICA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN UNA TORRE DE TELECOMUNICACIONES EN LA ALDEA SANTA ELENA BARILLAS, VILLA CANALES**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Energías renovables - Diseño y operación de proyectos eólicos y solares**, presentado por la estudiante **Alvaro Antonio Orellana Leal** carné número **9415687**, quien optó por 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 ARTES en Energía Y Ambiente.

Y 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 Décimo, 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.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

Mtro. Hugo Yovany Sánchez Ochoa  
Asesor(a)

Hugo Yovany Sánchez Ochoa  
Ingeniero Electricista  
Colegiado 5515  
Msc. Formulación y Evaluación de Proyectos

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque  
Coordinador(a) de Maestría

Mtro. Edgar Darío Álvarez Coí  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería





EEP-EIME-0778-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN ANÁLISIS DE GENERACIÓN EÓLICA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN UNA TORRE DE TELECOMUNICACIONES EN LA ALDEA SANTA ELENA BARILLAS, VILLA CANALES**, presentado por el estudiante universitario **Alvaro Antonio Orellana Leal**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

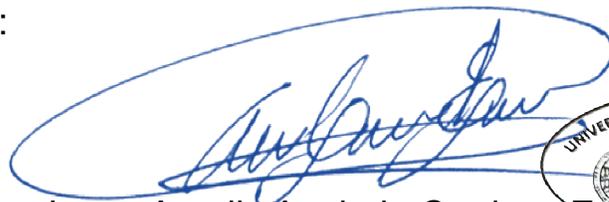
Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo  
Director  
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica

Guatemala, junio de 2022

LNG.DECANATO.OI.585.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DE GENERACIÓN EÓLICA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN UNA TORRE DE TELECOMUNICACIONES EN LA ALDEA SANTA ELENA BARILLAS, VILLA CANALES**, presentado por: **Alvaro Antonio Orellana Leal**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada ★

Decana

Guatemala, agosto de 2022

AACE/gaoc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por su bendición y amor.
<b>Mis padres</b>	Alvaro Antonio Orellana Barahona (q. e. p. d.) y Gilda Leonor Leal Rodríguez, por su gran amor y sabios consejos que han dado a mi vida, el mejor tesoro, este y todos los éxitos que tenga en la vida.
<b>Mis hermanos</b>	Luis y Roxana Orellana Leal, por su amistad, comprensión y apoyo en todo momento.
<b>Mi familia</b>	Silvia Ivone Salazar García y mi hija Gilda Gabriela Orellana Salazar por su incondicional amor, cariño y apoyo para alcanzar este triunfo.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser una influencia importante en mi educación y desarrollo laboral.
<b>Facultad de ingeniería</b>	Por haberme enseñado tanto e inculcado valores que desenvuelvo a diario en mi vida.
<b>Mis padres y hermanos</b>	Por la ayuda y apoyo necesarios para culminar mi carrera.
<b>Mi familia</b>	Mi esposa e hija por su comprensión, dedicación y apoyo.
<b>Mi asesor</b>	Msc. Ing. Hugo Geovany Sánchez Ochoa por su guía durante el trabajo de investigación.
<b>Br. Edvin González</b>	Por el apoyo brindado durante la investigación.
<b>Empresa de telecomunicaciones</b>	Por todas las facilidades para la realización de la investigación

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES.....	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
3.1. Descripción del Problema.....	10
3.2. Formulación del Problema.....	10
3.3. Delimitación del problema.....	11
3.4. Localización del lugar de estudio.....	12
4. JUSTIFICACIÓN.....	15
5. OBJETIVOS.....	17
5.1. General.....	17
5.2. Específicos .....	17

6.	NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN .....	19
7.	MARCO TEÓRICO .....	21
7.1.	Generación Eólica .....	21
7.1.2.	Viento.....	24
7.1.2.1.	Tipos de Viento .....	25
7.1.2.2.	Variación del Viento con la Altura .....	26
7.1.3.	Energía Cinética del Viento .....	28
7.1.3.1.	Potencia del Viento .....	29
7.1.4.	Aerogenerador .....	31
7.1.4.1.	Clasificación.....	32
7.1.4.1.1.	Aerogeneradores de eje vertical..	34
7.1.4.1.2.	Aerogeneradores de eje horizontal.....	35
7.2.	Consumo Energético.....	36
7.2.1.	Energía eléctrica .....	37
7.2.1.1.	Voltaje .....	38
7.2.1.2.	Corriente Eléctrica.....	39
7.2.2.	Eficiencia Energética.....	40
7.2.2.1.	Potencia Eléctrica .....	41
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	43
9.	MARCO METODOLÓGICO.....	45

9.1.	Características del Estudio .....	45
9.2.	Unidades de Análisis .....	46
9.3.	Variables.....	46
9.4.	Fases de Estudio .....	47
9.4.1.	Fase 1: Exploración Bibliográfica .....	47
9.4.2.	Fase 2: Recolección de la Información.....	48
9.4.2.1.	Conocer el Potencial Eólico Disponible .....	49
9.4.2.2.	Construcción del Gráfico de la Potencia.....	49
9.4.3.	Fase 3: Análisis de Datos.....	50
9.4.4.	Fase 4: Elección de la Turbina Eólica .....	52
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN .....	53
11.	CRONOGRAMA .....	55
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO.....	57
13.	REFERENCIAS .....	59



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1. Localización del área en estudio.....	13
2. Producción teórica de potencia.....	33
3. Cronograma.....	55

### TABLAS

I. Tabla de Variables .....	46
II. Equipos de medición, variables y unidades de medida.....	48
III. Tabla de Dirección y Velocidad del Viento.....	49
IV. Datos estadísticos mensuales de velocidades del viento .....	51
V. Recursos necesarios para la investigación .....	57



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
<b>h</b>	Altura
<b>h<sub>0</sub></b>	Altura referencial estándar
<b>A</b>	Amperios
<b>φ</b>	Ángulo de latitud
<b>A</b>	Área
<b>n</b>	Coefficiente de espectro geográfico
<b>I</b>	Corriente (Amperios)
<b>AC</b>	Corriente Alterna
<b>DC</b>	Corriente directa
<b>C</b>	Culombio
<b>P/A</b>	Densidad de potencia del viento (w/m <sup>2</sup> )
<b>ρ</b>	Densidad del aire (kg/m <sup>3</sup> )
<b>dq</b>	Diferencial de carga (Culombio)
<b>dt</b>	Diferencial de tiempo (segundos)
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>E</b>	Energía (Joules)
<b>°C</b>	Grados Centígrados
<b>ha/MW</b>	Hectárea por mega watt
<b>=</b>	Igual que
<b>kg</b>	kilogramo
<b>M</b>	Masa (kg)
<b>m/s</b>	Metros por segundo
<b>P<sub>d</sub></b>	Potencia disponible (Watt)

<b>P</b>	Potencia eléctrica
<b>P<sub>atm</sub></b>	Presión atmosférica
<b>s</b>	Segundo
<b>GPS</b>	Sistema de posición global ( <i>Global Positioning system</i> )
<b>T</b>	Temperatura del aire °K
<b>v<sub>0</sub></b>	Velocidad del viento a la altura de referencia h <sub>0</sub>
<b>v</b>	Velocidad del viento en metros por segundo
<b>V<sub>cd</sub></b>	Voltaje de corriente directa
<b>V</b>	Voltio
<b>W</b>	Watt

## GLOSARIO

<b>Anemómetro</b>	Instrumento para medir la velocidad de circulación de un fluido gaseoso, en especial del viento.
<b>Axial</b>	En dirección al eje.
<b>BTS</b>	Estación Base de Telecomunicaciones.
<b>Combustible Fósil</b>	Combustible que procede de la descomposición natural de la materia orgánica a lo largo de millones de años, como el petróleo, el carbón mineral o el gas natural.
<b>Demanda Eléctrica</b>	Cantidad de electricidad requerida por los consumidores para cubrir sus necesidades.
<b>Eje</b>	Barra cilíndrica que atraviesa un cuerpo giratorio y le sirve como centro para girar.
<b>Energía cinética</b>	Energía debida a un movimiento determinado.
<b>Energía potencial</b>	Energía que contiene el agua debido a la altura y es aprovechable para generar electricidad a partir de la misma.

<b>INSIVUMEH</b>	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
<b>Matriz energética</b>	Es la combinación de fuentes de energía primaria que se utiliza en una zona geográfica.
<b>Motogenerador</b>	Máquina térmica capaz de transformar la energía química, contenida en un determinado combustible, en energía mecánica y, posteriormente, en energía eléctrica mediante un alternador acoplado al eje de este.
<b>Sistema</b>	Objeto complejo cuyas partes o componentes se relacionan con al menos alguno de los demás componentes.
<b>Sustentación</b>	Es la fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido, de dirección perpendicular a la dirección de la corriente incidente.
<b>Veleta</b>	Una veleta es un dispositivo giratorio que consta de una placa que gira libremente, un señalador que indica la dirección del viento y una cruz horizontal que indica los puntos cardinales.

## RESUMEN

Las empresas de telecomunicaciones en Guatemala continúan expandiéndose para alcanzar una mayor área de cobertura celular, mejorándola en áreas donde exista deficiencia y actualizando los equipos para proveer mejores servicios como: telefonía celular, telefonía fija, transporte de datos y transmisión de cable por televisión. Proporcionar un servicio de calidad requiere entre otras cosas, que los equipos funcionen correctamente y de forma continua, razón, por la cual, estos deben estar energizados siempre.

Con el agotamiento de los combustibles fósiles y el encarecimiento de estos, la utilización de energías alternativas se ve como una solución, una de ellas es el aprovechamiento de la energía eólica para su conversión en energía eléctrica. Guatemala es un país con alto potencial eólico y la presente investigación pretende realizar un análisis de la cantidad de energía eólica que puede aprovecharse en una torre de telecomunicaciones para optimizar el uso de la energía eléctrica que consumen los equipos determinando así, el mejor equipo de generación eólica que podría ser implementado.

Los resultados obtenidos pretenden ser una guía que puede utilizarse en torres de telecomunicaciones con características similares a la estudiada en esta investigación, para que puedan implementarse generadores eólicos aprovechando un recurso cada vez más utilizado como lo es el viento.



# 1. INTRODUCCIÓN

Investigadores en consenso indican que el fuego fue descubierto hace 400,000 años, la humanidad aprendió a sacarle provecho, por lo que se utilizaba para proveer calor, luz, protección contra las amenazas de la naturaleza, para cocinar los alimentos, entre otros.

El ser humano ha utilizado el entorno para beneficiarse, para facilitarse el trabajo o para realizarlo más rápido, en consecuencia, para mejorar el estilo de vida. Así como ha utilizado el fuego, también aprovecha otras fuentes de energía como lo son los combustibles fósiles y las fuentes de energías renovables.

Con el crecimiento poblacional se necesita del uso de más fuentes de energía que, dicha acción, con la utilización de combustibles fósiles, se incrementa la cantidad de gases de efecto invernadero, esto, sumado al agotamiento del petróleo, se requiere de estudios que analicen el aprovechamiento de las energías renovables como lo son el sol, el viento, las corrientes de agua, las olas del mar, entre otros. Este es uno de los objetivos de la actual investigación.

En Guatemala, la energía del viento es poco aprovechada y no existe un estudio sobre generación eólica que optimice el consumo de energía en torres de telecomunicaciones en la aldea de Santa Elena Barillas, municipio de Villa Canales, departamento de Guatemala, por lo que la presente investigación presentará uno, con el fin de aprovechar este tipo de energía alternativa en una torre de telecomunicaciones.

El estudio mostrará la forma como se puede aprovechar el recurso eólico en una torre de telecomunicaciones para generar electricidad y la selección de la tecnología que mejor se adecúe a la misma, de esta forma, los ingenieros de campo e ingenieros de implementación obtendrán una valiosa herramienta para el ahorro de costos en la factura eléctrica manteniendo limitado el efecto contaminante.

Se suministrarán los cálculos de la energía eléctrica generada por la turbina eólica obtenida de la energía cinética de los vientos en el lugar en estudio, esta energía podría alimentar a los equipos de telecomunicaciones con el fin de reducir la facturación eléctrica y tendría un mínimo impacto ambiental.

Para obtener los datos de las características del viento, se aplicará la técnica de corta duración con el objetivo de tomar mediciones de la dirección del viento y de su velocidad en un período que tendrá una duración de tres meses, para las mediciones se utilizará un anemómetro y una veleta, se construirá una tabla con los valores obtenidos, luego se podrá obtener la cantidad de potencia del viento, el gráfico de la rosa de los vientos y la distribución de *Weibull* que nos proporcionará probabilidades como por ejemplo la existencia de velocidades que se encuentren dentro de parámetros importantes para el estudio; las mediciones son factibles para realizarlas con recursos propios.

En el capítulo 1, se presentarán las bases teóricas para la generación eólica y sus principales preceptos. En el capítulo 2, se obtendrán los datos de velocidades y direcciones del viento, tabulándolas en una tabla de velocidades antes de realizar la recomendación de un análisis y de los datos posteriores para una futura implementación. En el capítulo 3, se analizarán los datos obtenidos, se construirá una gráfica de la rosa de los vientos y se realizará la distribución de *Weibull* para obtener probabilidades del comportamiento del viento.

En el capítulo 4, se discutirá acerca de la mejor opción de turbina eólica para la generación eléctrica en la torre de telecomunicaciones de Santa Elena Barillas, según los datos obtenidos y analizados en los anteriores capítulos.



## 2. ANTECEDENTES

En el departamento de Guatemala no se encontraron estudios publicados sobre generación eólica aplicada en torres de telecomunicaciones. Sin embargo; existen estudios de generación eólica en edificaciones, vallas publicitarias y sistemas de bombeo para minimizar el costo en el uso de energía eléctrica. A continuación, se presentan algunos casos de estudio sobre generación eólica en torres de telecomunicaciones.

En la tesis de Maestría titulada: *Sistema Híbrido De Produção De Energía Para Sistema De Comunicações Rádio*, Patricio (2013) indica que es posible la implementación de una solución de energías alternativas en una torre de telecomunicaciones, aplicando la instalación de un aerogenerador que funcione como un sistema dual junto con generación solar. También, explica que el sistema combinado puede sufragar las necesidades energéticas, además, presenta el valor monetario del montaje híbrido, siendo de 21,000.00€ retornando 4,200.00€ anuales, por lo que, la inversión es factible. Esta información es de importancia, para determinar el costo aproximado de una implementación energética eólica en Santa Elena Barillas.

En la tesis de Maestría titulada: *An Economic Assessment of Micro-Scale Use of Renewable Energy Sources: Two Case Studies*, para Palomino (2015) es necesario el uso de energías alternativas inagotables como lo son la energía proporcionada por el viento y la obtenida del sol, ambas energías no producen CO<sub>2</sub> y son las compañeras perfectas, además, la capacidad de generación de energía eléctrica es considerable, siendo su uso de beneficio para la sociedad y para la naturaleza, a su vez, expone que la instalación de turbinas eólicas de

baja escala en torres de telecomunicaciones es adecuado y factible, pero, el viento debe tener la velocidad adecuada, al hacer el estudio determinó que se debe tener un promedio por lo menos de 7 m/s. La implementación de un aerogenerador es aún más viable si la empresa que la realiza es dueña de la torre. La información anteriormente descrita indica la escala de turbina eólica que debe utilizarse en el estudio para realizar una posible implementación con el menor costo.

En la tesis de Maestría titulada: *Performance-Objective Design Of A Wind-Diesel Hybrid Energy System For Scott Base, Antarctica*, Frye (2006) se explica, que estudia la forma de operar la base Scott de la forma más sostenible posible ya que operan al 100 % con derivados del petróleo, también expone que el recurso eólico de la estación se obtuvo mediante una estación de monitoreo montada en la base, llegaron a la conclusión que una velocidad promedio de 7.54 m/s es adecuada para la instalación del generador eólico, Frye detalla que el modelo del 100 % de carga soportado por energía eólica aporta un ahorro del 30 % de diésel considerando los tiempo en que las velocidades del viento son menores a las deseadas. Lo anteriormente expuesto indica el ahorro que se obtendrá sobre el equipo electrógeno.

En la tesis de graduación titulada: *Generación Alternativa para Repetidoras de Telecomunicaciones ubicadas en Zonas Remotas*, Fernández (2006) expone que en la torre ubicada en la zona remota denominada La Tortuga, se obtuvo una solución alternativa con la implementación de dos turbinas eólicas con una potencia de 1 kw. cada una, realizó la comparación de la solución indicada con la del uso de generación solar, determinando que, a causa del consumo eléctrico menor a 2 kw en el lugar indicado, se tiene un costo menor al utilizar generación eólica comparado con implementar generación fotovoltaica, además, la turbina eólica utilizar menor espacio para su construcción que la solar,

se descartó el uso de una combinación de las 2 tecnologías a causa del consumo energético menor a 2 kw. Con lo antes indicado se obtiene información importante sobre la orientación de la tecnología a utilizar dependiendo del consumo energético en la torre ubicada en la Aldea de Santa Elena Barillas, Villa Canales.

En la tesis de graduación titulada: *Estudio de Factibilidad de un Sistema de Electrificación Autónomo Eólico para Sistemas de Telecomunicación en Zonas Rurales del Callejón Interandino del Ecuador*, Escobar (2012) determinó que la utilización de generación eólica para el autoconsumo es posible, así como su implementación puesto que los análisis determinaron que tanto la velocidad del viento como la temperatura son adecuadas, de la misma forma, sugiere la implementación de otros proyectos del mismo tipo en el futuro, ya que, pueden generar electricidad con una potencia considerable a un bajo precio de adquisición. Explica que el valor de los equipos es de (\$ 2590.00) con un costo anual de \$ 411.00 para 15 años, lo que nos provee de información relevante sobre los costos del equipo eólico que podrían implementarse en la torre de telecomunicaciones.

En la tesis de graduación titulada: *Estudio sobre la relación entre infraestructuras de telecomunicaciones y sistemas de energía removable*, Fernández (2018) expone la relación existente entre las infraestructuras de telecomunicaciones y las energías renovables se aplica en lugares remotos donde el acceso a la energía comercial no es posible, motivo por el que hace unos años las infraestructuras de telecomunicaciones eran alimentadas con combustibles fósiles como el diésel, pero esta opción resulta muy contaminante y cara. La idea de optar por energías renovables amigables con el ambiente como lo son la solar y eólica son cada vez más utilizadas, además, en la actualidad los aerogeneradores pueden llevar sensores que miden la velocidad del viento, humedad, temperatura para que por medio de las telecomunicaciones sean

monitoreados y funcionen por mayor tiempo. Este estudio provee una guía sobre tecnologías ligadas a las telecomunicaciones alimentadas por energías renovables, así como el tipo de estructura en la que un generador eólico que se puede implementar.

### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En algunas regiones de Guatemala se tiene una velocidad del viento considerable, es tan fuerte que se tiene el conocimiento sobre algunos emprendedores que desean aprovecharlo y obtener rentabilidad de los 7,800 megavatios de energía eólica de los cuales únicamente se utilizan 107 megavatios en las plantas de generación eólica ubicadas en Villa Canales, San Vicente Pacaya y Agua Blanca, expone Minas, (2018).

Las empresas de comunicación móvil celular cuentan con instalaciones radiales que se encuentran en ubicaciones donde el potencial eólico es favorable, aunque, en Guatemala no existen estudios sobre el tema para el aprovechamiento de dicha energía. La mayoría de las instalaciones eléctricas en las torres de telecomunicaciones utilizan energía eléctrica convencional o de uso común proveniente de fuentes de energía no renovables como el petróleo y sus derivados, el carbón, etcétera.; promoviendo el consumo de estas fuentes que son limitadas.

Lo anterior conlleva a un consumo eléctrico mayor para las compañías de telecomunicaciones, las cuales buscan métodos para reducir la facturación eléctrica de sus sitios y ser más competitivas.

### **3.1. Descripción del Problema**

El problema del caso en estudio es que no existe un aprovechamiento de la energía eólica para torres de telecomunicaciones en Guatemala y en especial en Santa Elena Barillas.

Una torre de telecomunicaciones emplea equipo electrónico para la comunicación móvil celular, proveer servicios de internet y para transporte de datos, contiene un sistema de iluminación, un sistema de climatización, grupo electrógeno; en conjunto es un consumo energético considerable que requiere una optimización.

### **3.2. Formulación del Problema**

El proyecto de investigación se desarrolla para determinar la cantidad de energía eólica que puede ser convertida en energía eléctrica en el lugar del estudio, por lo que se pretende contestar las preguntas descritas a continuación.

- Pregunta central
  - ¿Es posible realizar generación eólica para optimizar el consumo energético en la torre de telecomunicaciones ubicada en la aldea Santa Elena Barillas?

- Preguntas auxiliares
  - ¿Cuál es el gasto de energía eléctrica para saber si existirá un ahorro al utilizar generación eólica en la torre de telecomunicaciones de Santa Elena Barillas?
  - ¿Es adecuada la energía cinética del viento para optimizar el consumo energético al utilizar generación eólica en la torre de telecomunicaciones?
  - ¿Cuál es el generador adecuado para optimizar el consumo energético en la torre de telecomunicaciones ubicada en Santa Elena Barillas?

### **3.3. Delimitación del problema**

El consumo energético de los equipos y sistemas de la torre de telecomunicaciones es vital para su funcionamiento, Flores (2019) presentó una tesis titulada *Optimización de generación y consumo de electricidad mediante tecnologías complementarias, en torres de telecomunicaciones ubicadas fuera de la red eléctrica nacional* en la cual expone que los sitios de telecomunicaciones poseen equipos de transmisión de datos vía microondas, sistemas de climatización doble de 5 toneladas, 1 o 2 BTS's, Sistema de iluminación y Sistema de alarmas por lo que cuentan con motogeneradores de respaldo de hasta 22 kW, aunque, el consumo de energía en las torres que poseen 1 BTS es de 3.5 kWh.

El incremento de las necesidades de comunicación de los usuarios o de la cantidad de estos puede requerir equipos de comunicación más robustos o la ampliación de los que están operando por lo que el consumo de energía es mayor.

Lo que describe el párrafo anterior es una menor rentabilidad de la torre de telecomunicaciones ya que el costo de la electricidad es considerable, la energía eléctrica es parte del costo operativo de la torre por lo que el incremento en este rubro puede provocar un incremento del precio de los servicios prestados por la empresa de telecomunicaciones lo que conduciría a una menor demanda.

Esto lleva a plantear la pregunta principal de este estudio: ¿se puede realizar generación eólica para optimizar el consumo energético en la torre de telecomunicaciones?

### **3.4. Localización del lugar de estudio**

El área en estudio se encuentra ubicada en la finca de la aldea de Santa Elena Barillas, municipio de Villa Canales, departamento de Guatemala. Se encuentra a una altura de 1912 m. sobre el nivel del mar, con una latitud de 14°24'24.75" norte y una longitud de 90°31'47.45" oeste. La finca se encuentra comunicada por una carretera asfaltada, dentro de la finca se debe recorrer 1 kilómetro de terracería hasta llegar al punto de estudio. El acceso es vehicular.

En el lugar de estudio se realizará la recolección de datos tanto del consumo energético de los equipos como las variaciones de la velocidad del viento durante los meses de julio a septiembre del 2022.

Figura 1. Localización del área en estudio



Fuente: Fotografía de Alvaro Orellana tomada de Google Earth Pro (2022). Consultado el 23 de abril de 2022. Colección particular. Santa Elena Barillas, Villa Canales.



## 4. JUSTIFICACIÓN

Esta investigación está enfocada en la línea de investigación sobre sistemas de energía renovable con énfasis al diseño de un proyecto de energía eólica de la Maestría en Energía y Ambiente.

La energía eólica es una excelente fuente de energía ya que al igual que la solar, es constante, pudiendo ser convertida en energía eléctrica mediante un aerogenerador proporcionando así energía eléctrica limpia y barata. Éste estudio fue seleccionado ya que cumple con el siguiente objetivo: no existe un análisis sobre el aprovechamiento de energía eólica para optimizar el consumo eléctrico en torres de telecomunicaciones en Guatemala, especialmente Villa Canales.

La presente investigación expondrá un detalle de los cálculos, para la selección de la tecnología eólica que mejor se adecúe a la torre de telecomunicaciones de la cual, se obtenga mayor eficiencia energética y, por lo tanto, un mayor ahorro en la facturación. Debido al incremento en el precio de la electricidad a causa de los cambios de precio del petróleo, este tipo de estudios son de especial interés.

El estudio será una herramienta que proporcionará en forma detallada las bases para la selección de la mejor opción en fuentes de energía eólica y los beneficios que se obtendrán de ella, especialmente la optimización del consumo energético. De esta forma, los ingenieros de campo e ingenieros de implementación podrán utilizarlos en torres de telecomunicaciones que posean características similares a la evaluada en este estudio. Para gestiones ambientales, el estudio será de mucha ayuda ya que con la implementación de

una tecnología limpia como la propuesta se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y se limita el uso de combustibles fósiles.

El estudio beneficia a las compañías de telecomunicaciones, a las viviendas cercanas, a la torre de telecomunicaciones y al ambiente. También se obtiene un efecto positivo en la matriz energética ya que se reduce la dependencia de combustibles fósiles al utilizar tecnología de generación limpia.

Este trabajo de investigación se centrará únicamente en el estudio de generación eólica en la torre de telecomunicaciones ubicada en la aldea Santa Elena Barillas del municipio de Villa Canales, no se realizará ninguna implementación, pero se proporcionarán los cálculos y el análisis para la optimización de la energía eléctrica con el aprovechamiento del recurso eólico en las torres de telecomunicaciones con características similares.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

Realizar un análisis de generación eólica para optimizar el consumo energético en la torre de telecomunicaciones en Santa Elena Barillas, Villa Canales.

### **5.2. Específicos**

- Determinar el gasto de energía eléctrica para saber si existirá un ahorro al utilizar generación eólica en la torre de telecomunicaciones ubicada en Santa Elena Barillas, Villa Canales.
- Establecer si la energía cinética del viento es adecuada para optimizar el consumo energético al utilizar generación eólica en la torre de telecomunicaciones ubicada en Santa Elena Barillas, Villa Canales.
- Especificar el aerogenerador adecuado para optimizar el consumo energético en la torre de telecomunicaciones ubicada en Santa Elena Barillas, Villa Canales.



## 6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Este estudio aporta un análisis para evaluar una solución de generación eólica, fuente renovable que se aprovechará para alcanzar una optimización en el consumo de energía eléctrica de la torre de telecomunicaciones, contribuyendo al fomento del uso de energías renovables, uno de los temas tratados en el documento *Estrategia de Política en Eficiencia Energética Para el Sector Eléctrico de Centroamérica y República Dominicana*, documento a cargo de BUN-CA en el marco del plan ambiental para la región Centroamérica (PARCA).

La investigación que se presenta está orientada a realizar una evaluación del potencial de la energía eólica en la torre de telecomunicaciones ubicada en la aldea de Santa Elena Barillas, por lo que se determinará la existencia de vientos superiores a 5 m/s o la existencia de vientos moderados (entre 3 y 5 m/s) para su aplicación en la generación eléctrica con turbina eólica.

El estudio presenta los procedimientos, la metodología y los medios que se utilizan para seleccionar una turbina eólica adecuada para la torre de telecomunicaciones y que será un incentivo para que puedan ser utilizados y aplicados a nivel nacional en otras torres de telecomunicaciones.

Por otro lado, se aplicará el cálculo de la generación eléctrica proporcionada por el aerogenerador, dicha electricidad sería restada de la energía utilizada por la radio-base en el período de facturación si se llega a implementar, se incluirán los costos para la implementación de la turbina eólica.

La selección de la presente investigación cumple con el siguiente objetivo:  
No existe un estudio sobre el aprovechamiento de la energía eólica para la optimización del gasto energético en torres de telecomunicaciones en Guatemala, especialmente, Villa Canales.

## **7. MARCO TEÓRICO**

Según Ramos y Riveros (2018), “para optimizar el pago por consumo de energía y potencia, las recomendaciones están en función al consumo de potencia” (p. 82). Se puede realizar una optimización del gasto de energía siguiendo los ejemplos: utilizando equipos más eficientes, reduciendo el área de influencia de los sistemas de enfriamiento, aplicando sistemas de generación alternativa como la eólica. La última puede interpretarse de distintas formas. No obstante, para entender cada una de ellas, será importante definir algunos conceptos claves en el tema de estudio entre los cuales se encuentran: energía eólica, generación eólica, tipos de aerogeneradores, consumo energético, energía eléctrica y eficiencia energética.

### **7.1. Generación Eólica**

Se puede generar electricidad con el aprovechamiento del recurso eólico de un lugar, al utilizar la energía del aire en movimiento, o sea, la energía cinética, a este proceso se le conoce como generación eólica. Este tipo de generación de energía es llamada limpia o verde y es del tipo renovable ya que las reservas son inagotables, siempre hay disponibilidad del sol y del viento, además, a diferencia del petróleo, no hay necesidad de trasladar el viento hasta la zona requerida. Según indica Villarrubia (2013), “actualmente, la energía eólica ha demostrado su viabilidad técnica y económica, siendo una tecnología madura. Varias razones hacen de la eólica una de las energías renovables con gran desarrollo en los últimos años” (P. 13). Se debe agregar que el uso de esta tecnología reduce el impacto que causan las emisiones de gases de efecto invernadero.

Cualquier tipo de energía tiene ventajas y desventajas, la energía eólica presenta las siguientes ventajas:

- No emite gases contaminantes, ni efluentes líquidos, ni residuos sólidos. Tampoco utiliza agua.
- Reduce emisiones de CO<sub>2</sub>. En España, en 2009, la producción eólica fue de 36.188 GWh, lo que se tradujo en un ahorro de emisiones de 16,6 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, (considerando una emisión específica de CO<sub>2</sub> asociada a la producción de electricidad de 460 toneladas de CO<sub>2</sub> por GWh eléctrico).
- No requiere minería de extracción subterránea o a cielo abierto.
- Su uso y los posibles incidentes durante su explotación no implican riesgos ambientales de gran impacto (derrames, explosiones, incendios, entre otros).
- Ahorra combustibles, diversifica el suministro y reduce la dependencia energética.
- Tiene un período de recuperación energética pequeño. Se requiere solo unos pocos meses de funcionamiento para recuperar la energía empleada en la construcción y montaje de un gran aerogenerador eólico. (Villarrubia, 2013, p.13)

Las desventajas del uso de generación eólica son las que se presentan continuación:

- El viento es aleatorio y variable, tanto en velocidad como en dirección, por lo que no todos los lugares son adecuados para la explotación técnica y económicamente viable de la energía eólica.
- La producción eólica forma parte de una combinación de generación, junto con otras fuentes de energía (hidráulica, térmica, nuclear, entre otros).

- Dada su variabilidad deben realizarse previsiones de producción a muy corto plazo (24 y 48 horas) para una adecuada gestión de la cadena de generación, transporte y distribución de electricidad.
- Su aleatoriedad y variabilidad requiere una mayor presencia de potencia rodante y una gestión específica para su integración en la red.

Su impacto ambiental es muy reducido y solo a escala muy local:

- Aumento del nivel de ruido en sus proximidades.
- Impacto visual o paisajístico.
- Impacto sobre la fauna, en particular sobre las aves.

Ocupación del suelo: los aerogeneradores deben mantener una distancia entre sí que minimice los efectos de interferencia y de estela. Se recomienda una distancia entre torres de 3 a 5 veces el diámetro del rotor en la dirección perpendicular al viento dominante y de 5 a 10 veces en la dirección del viento dominante. Para parques con aerogeneradores entre 1 y 3 MW, la ocupación de terreno es de 3 a 6 ha/MW, aunque menos de un 5 % queda afectado por la servidumbre de uso, pudiendo utilizarse el resto para fines agrícolas o agropecuarios.

- Interferencias con transmisiones electromagnéticas: el rotor puede producir interferencias con campos electromagnéticos (televisión, radio, entre otros). (Villarrubia López, 2013, p.14).

La energía eólica es muy beneficiosa, inclusive puede aprovecharse en alta mar al utilizar los vientos generados sobre los océanos, a pesar de las preocupaciones sobre la contaminación acústica, el viento es una fuente de energía puramente limpia. También tiene una huella de CO<sub>2</sub> muy baja y no genera contaminación del aire. La producción de energía eólica reduce los gases

de efecto invernadero porque puede reemplazar otras formas de energía contaminante como lo son el petróleo y el carbón.

### **7.1.2. Viento**

Los vientos son causados por la acción del sol sobre la tierra.

La energía del viento se debe al calentamiento diferencial de la atmósfera por el sol y las irregularidades de la superficie terrestre, aunque sólo una pequeña parte de la energía solar que llega a la tierra se convierte en energía cinética del viento (Fernandez, 2006, p. 8).

Como la tierra es redonda, se calienta de manera diferente y por lo tanto se producen diferencias de temperatura que hacen que las regiones tropicales sean muy calientes y las regiones polares muy frías. Estas diferencias de temperatura crean alta y baja presión y ponen el aire en movimiento, esto se aplica tanto a nivel local como en el sistema eólico global. Está comprobado que el aire a mayor temperatura es más ligero que el aire frío. La razón es que el calor provoca movimiento, por lo que, con el calor las moléculas de aire se dispersan. Habrá una mayor distancia entre las moléculas individuales, y menos moléculas de aire por  $m^3$ . La baja presión se produce cuando el aire cálido y ligero se eleva, al que le faltará algo de aire y, por lo tanto, la presión disminuye y decimos que tenemos una baja presión. Cuando el aire se eleva alrededor de una baja presión, se enfría y se forman nubes y lluvia. Por lo tanto, la baja presión se asocia a menudo con el llamado mal tiempo.

Fernandez (2006) explica que el frío ralentiza el movimiento, por lo que en el aire frío las moléculas de aire se acumulan de modo que hay muchas moléculas de aire por  $m^3$ . La alta presión se produce cuando el aire baja. Cuando el aire está cerca del suelo, se seca y se calienta. Por lo tanto, la alta presión a

menudo se asocia con un clima cálido y soleado. La naturaleza siempre intentará crear una especie de equilibrio. Por lo tanto, el aire es forzado desde las áreas de alta presión hacia las áreas de baja presión. Lo sentimos como si estuviera soplando, y cuanto mayor es la diferencia de presión, más sopla. El sol calienta la tierra, el mar, lagos, entre otros. Aunque, se debe considerar que debido a la estructura molecular de el agua, el calor debe romper los enlaces de hidrógeno entre las moléculas, eso quiere decir que necesita una mayor cantidad de energía para elevar su temperatura que la tierra. De hecho, las áreas terrestres se calientan más rápido que las zonas con agua. Cuando el área terrestre es más cálida que los alrededores (lago o mar), el aire más cálido se elevará sobre la tierra que sobre el agua. Habrá una baja presión sobre la tierra. Se levantará un viento para igualar la diferencia de presión, por lo que en el suelo el viento proviene de la alta presión y se dirige hacia la baja presión.

Para Fernández (2018) a pesar que el viento no es constante por las razones descritas anteriormente, se puede calcular en base a probabilidades y a la función de distribución, las horas y velocidades del viento por año. El aire se encuentra presente en todo el planeta siendo una fuente inagotable de energía, su comportamiento ha sido estudiado por meteorólogos y los institutos de meteorología de los diversos países proporcionando información sobre las características del viento, estas permiten que se pueda predecir cuánta energía eólica se puede aprovechar en la zona a evaluar.

#### **7.1.2.1. Tipos de Viento**

El viento consiste básicamente en vórtices en la atmósfera. Los vientos son masas de aire que, con mayor o menor fuerza, están en movimiento y se afectan entre sí. Una brisa fresca en un día de verano puede ser una de las mejores cosas, mientras que los huracanes pueden arrancar techos y costar

vidas. Para los proyectos de generación eólica es necesario conocer a detalle el tipo y otras características de los vientos en el lugar de estudio.

Cucó (2017) explica que el estudio de los vientos en la atmósfera se divide en 3 escalas: macro-escala, meso-escala y micro-escala.

Macro-escala: en esta escala se estudian los vientos que tienen lugar en amplias zonas de la superficie de la Tierra, del orden de los 1000 km en horizontal y hasta el límite de la atmósfera en altura. Estos vientos son llamados vientos globales o terráqueos.

Meso-escala: en esta escala se estudian los vientos que se desarrollan en zona sobre la superficie terrestre con dimensiones comprendidas entre 10 y 100 km y una altura comprendida entre 1 y 10 km. En esta escala podemos encontrar los vientos estacionales y los vientos locales.

Micro-escala: en esta escala se estudian los vientos que se desarrollan sobre la superficie de la tierra en zonas comprendidas entre 5 y 10 km y hasta unos 200 mts de altura. Aquí los vientos están influidos por rozamiento con el suelo y los obstáculos del terreno. (Cucó, 2017, p. 14 y 15).

La sección que interesa para la realización del estudio es la micro-escala ya que dentro de las dimensiones de la misma se encuentran las zonas donde operan los aerogeneradores, en dicha escala se centra el interés para realizar el análisis de la investigación.

### **7.1.2.2. Variación del Viento con la Altura**

El viento es un fenómeno resultante de las variaciones de temperatura en los volúmenes de aire o masas. Sin embargo, el viento que se produce cerca del

suelo y que utilizan los aerogeneradores es diferente. Cuando las masas de aire fluyen sobre la superficie más o menos rugosa de la tierra, la velocidad del flujo se ralentiza y la capa límite cercana al suelo se desarrolla con una distribución vertical característica de las velocidades del viento desde cero hasta la del viento geostrófico. Dado que las turbinas eólicas siempre funcionan en esta capa límite, el viento en esta capa es de particular interés.

El viento es un fenómeno resultante de las variaciones de temperatura en los volúmenes de aire o masas.

La velocidad del viento varía en función de la altura sobre el suelo. El estudio de dicha variación es de gran importancia por las siguientes razones:

Al aumentar la altura, aumenta la velocidad del viento y la potencia extraíble por el aerogenerador, lo que explica la tendencia a construir turbinas más altas.

Cada pala, al girar recorre puntos situados a diferente altura con diferentes velocidades de viento, por lo que está sometida a diferentes esfuerzos (más velocidad del viento al paso de la pala por la vertical superior que al paso por la vertical inferior), por lo que se generan cargas variables.

Lo descrito anteriormente indica la razón por la que las turbinas eólicas se construyen a gran altura, adicionalmente, es importante registrar las variaciones de la velocidad del aire por si llegasen a fallar los anemómetros. (Cucó, 2017, p. 14).

Guairacaja (2013) indica que en forma simplificada esta variación velocidad-altura, se puede expresar mediante la relación:

$$v=v_0*(h/h_0)^n$$

Donde:

$v$  = Velocidad del viento a la altura requerida  $h$

$v_0$  = Velocidad del viento a la altura de referencia  $h_0$

$h$  = Altura requerida

$h_0$  = Altura referencial estándar

$n$  = Coeficiente de espectro geográfico

El coeficiente de espectro geográfico depende de la estabilidad atmosférica y de la orografía considerada. Valores típicos son:

$n = 0.19$  para zonas llanas

$n = 0.29$  para zonas accidentadas (Guairacaja, 2013, p. 22 y 23).

### **7.1.3. Energía Cinética del Viento**

“Energía cinética: es el trabajo total realizado sobre una partícula por todas las fuerzas que actúan sobre ella relacionada con la velocidad de la partícula”. Sears et. al (2009, p. 182). Aplicada al viento se refiere a la energía que puede obtenerse de este, a causa de su movimiento. Para toda la tierra, esto corresponde a una cantidad de energía de alrededor de 100 veces el consumo mundial de energía.

El viento como fuente de energía se ha utilizado para la propulsión de embarcaciones y barcos, y para el funcionamiento de bombas de agua y turbinas desde tiempos inmemoriales. El viento está disponible en todo el mundo, pero para que la energía eólica se utilice con fines energéticos, se requieren vientos relativamente fuertes y sostenidos. Hernández et al., (2012) explica que “el conocimiento exhaustivo del comportamiento del viento es esencial para múltiples aplicaciones como: diseñar campos de generación de energía eólica, determinar el comportamiento de los ciclones tropicales, determinar la

periodicidad del viento, determinar el sitio de evaluación del recurso eólico” (p. 3).

Se realizará una medición en la zona de estudio para verificar si el viento posee la velocidad y energía suficiente para impulsar una turbina eólica que posea las características necesarias optimizando el consumo de energía de los equipos de telecomunicaciones.

#### **7.1.3.1. Potencia del Viento**

A la energía de un cuerpo en movimiento en este caso la masa del aire, la llamamos energía cinética, la cual, se puede transformar en energía eléctrica. El aire incidente en las palas de una turbina eólica se produce la rotación de misma, la cual, está unida por medio de un eje a un generador que produce energía eléctrica.

Al incidir el viento sobre las palas de una aero-turbina se produce un trabajo mecánico de rotación que mueve a su vez un generador para producir electricidad. La cantidad de energía que contiene el viento antes de pasar por un rotor en movimiento depende de tres parámetros: la velocidad del viento incidente, la densidad del aire y el área barrida por el rotor. (Álvarez, 2006, p. 26).

Hay un dato importante respecto de la rapidez con la que el viento incide en las palas del aerogenerador.

La velocidad a la que el aire pase por las palas resulta determinante, pues la energía cinética del viento aumenta proporcionalmente al cubo de la velocidad a la que se mueve. Por ejemplo: si la velocidad se duplica, la energía será ocho veces mayor. En cuanto a la densidad, la energía contenida en el viento aumenta de forma proporcional a la masa por unidad

de volumen de aire, que en condiciones normales (a nivel del mar, a una presión atmosférica de 1.013 milibares y a una temperatura de 15 °C) es de 1,225 kilogramos por cada metro cúbico. Esto quiere decir que, cuando el aire se enfríe y aumente de peso al volverse más denso, transferirá más energía al aerogenerador. Y, al contrario, cuando el aire se caliente o cuando se asciende en altitud, será menor la energía cinética que llegue a la turbina. (Álvarez, 2006, p. 27).

Para calcular la energía del viento al pasar por las palas del aerogenerador se utiliza la siguiente expresión:

$$P/A = 0.5\rho v^3$$

Donde:

P/A = densidad de potencia del viento ( $w/m^2$ )

$\rho$  = densidad del aire en el lugar ( $Kg/m^3$ )

v = velocidad media del viento (m/s)

La densidad del aire en una localidad ubicada a 0 m.s.n.m. y 1 atmósfera de presión es igual a 1.25  $Kg/m^3$ , y este valor varía con la altura geográfica, ya que cuando la cota geográfica sube, la densidad del aire disminuye, según la expresión:

$$\rho = 1.25[(268.13/T) (P_{atm}/760)]$$

Dónde:

T = temperatura promedio del aire del lugar (°K)

P atm. = presión atmosférica del lugar (mm Hg)

268.13 = temperatura equivalente de la atmósfera superior (°K)

760 = valor de la presión atmosférica a nivel de mar (mm Hg)

$\rho$  = densidad del aire en el lugar ( $Kg/m^3$ ) (Guairacaja, 2013, p. 25)

Las expresiones anteriores ayudan a establecer cuánta energía se puede obtener del viento en un punto determinado.

#### **7.1.4. Aerogenerador**

Las turbinas eólicas se utilizan desde hace muchos años en forma de molinos de viento, ahora, se utilizan de forma común para convertir la energía primaria del viento en electricidad. Para Guairacaja (2013), “el aerogenerador es un generador de corriente eléctrica a partir de la energía cinética del viento, es una energía limpia y también la menos costosa de producir, lo que explica el fuerte entusiasmo por esta tecnología” (p. 9).

El criterio de ubicación más importante para las turbinas eólicas es la velocidad del viento más alta posible. Su apariencia característica, caracteriza el paisaje de grandes áreas en muchos países en la actualidad. En los llamados parques eólicos, a menudo se instalan varias turbinas eólicas muy cerca unas de otras. Éstos, según Guairacaja (2013), pueden ser construidos: “(...) sobre la costa del mar o incluso pueden ser instalados sobre las aguas a cierta distancia de la costa en lo que se llama granja eólica marina” (p. 10). Dichos parques transforman grandes cantidades de energía cinética del aire, convirtiéndola en cantidades elevadas de energía eléctrica, luego, la electricidad es inyectada a la red de distribución.

En la ubicación del estudio se tiene la sensación de un viento fuerte, con la energía necesaria para accionar un aerogenerador sin ningún problema. Los análisis revelarán si la suposición es correcta.

#### **7.1.4.1. Clasificación**

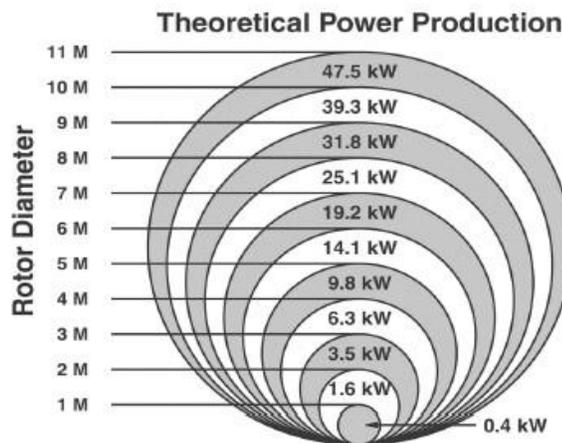
Hay una variedad extensa de tipos de aerogeneradores, la clasificación también puede serlo, pero, para el estudio se tomarán en cuenta únicamente 2 que son las que más interesan, una de ellas es clasificar las turbinas eólicas según la potencia y la otra es clasificarlas según el posicionamiento del eje. A continuación, se verán los tipos de generadores según la potencia.

- Aerogeneradores de potencia baja: son aquellos que entregan una potencia de hasta 100 Kw. Se utilizan principalmente para abastecer viviendas, así como establecimientos de pequeño tamaño, reservándose casi exclusivamente al ámbito privado. Se encuentran ubicados de manera dispersa alrededor del país.
- Aerogeneradores de potencia media: poseen una potencia de salida entre 100 Kw y 30 Mw, su aplicación se da generalmente en pequeños desarrollos comunitarios.
- Aerogeneradores de potencia alta: son aquellos capaces de generar más de 30 Mw. Son utilizados para proveer electricidad a la red nacional, por ello se encuentran comúnmente en zonas con gran potencial eólico. En general, se instalan varios generadores juntos, formando un parque eólico.

El tamaño del aerogenerador está directamente ligado a la potencia que posee el mismo. Por lo tanto, un generador de baja potencia será considerablemente más pequeño que uno de alta potencia. (Dodero y García, 2012, p. 17).

En la presente tesis se realizarán los cálculos y comparativas para elegir la turbina eólica que más se adecúe al sitio donde se encuentra la torre de telecomunicaciones, facilitando de esta forma, la selección de turbinas eólicas para otras torres con equipos de telecomunicaciones que se encuentren en condiciones similares.

Figura 2. **Producción teórica de potencia**



Fuente: Dodero y García. (2012). *Generador Eólico de Baja Potencia*.

Con los datos indicados anteriormente se puede apreciar la diferencia entre las turbinas de diferente potencia y se puede elegir la adecuada para las necesidades requeridas, como podría ser inyectar o vender electricidad, optimizar el consumo eléctrico. En el presente análisis se estudiarán los aerogeneradores de baja potencia, puesto que, el consumo de energía en la torre de telecomunicaciones es menor a 100 kw.

La segunda clasificación de turbinas eólicas compete a la orientación del eje respecto de la dirección del viento, de este tipo se consideran 2: eje horizontal y eje vertical.

#### **7.1.4.1.1. Aerogeneradores de eje vertical**

Existe una amplia variedad de turbinas eólicas, para Álvarez (2006), “el aerogenerador de eje horizontal con rotor tripala a barlovento es hoy el modelo más utilizado para generar electricidad” (p. 32). Existen, sin embargo, otra variante de turbina cuyo eje se encuentra a 90° del suelo, es llamado de eje vertical.

La máquina más conocida de este tipo es la turbina Darrieus, que fue patentada por el ingeniero francés George Darrieus en 1931 y comercializada por la empresa estadounidense Flowind hasta su quiebra en 1997. El aerogenerador está compuesto por un eje vertical, en el que giran varias palas con forma de C. Algo similar a un batidor de huevos. Su ventaja principal es que no necesita ningún sistema de orientación que lo dirija hacia el viento. No obstante, es menos eficiente que un aerogenerador de eje horizontal, requiere ayuda para arrancar y recibe menos viento al estar pegado al suelo. (Álvarez, 2006, p. 32).

Como cualquier equipo, se tienen ventajas y desventajas. Las turbinas verticales presentan las siguientes ventajas:

No necesita orientarse respecto a la dirección donde sopla el viento, aprovechando eficientemente la fuerza directa del viento sin desperdiciar parte de esta. Otra de las ventajas que posee es que los equipos de generación y control se encuentran en el pie de la estructura, a nivel del suelo, lo cual simplifica y abarata considerablemente las operaciones de mantenimiento. (Dodero y García, 2012, p. 18).

En zonas con variaciones muy frecuentes de las velocidades del aire se pueden aprovechar estos tipos de aerogeneradores.

Dodero y García (2012) exponen que las turbinas eólicas de eje vertical poseen desventajas, una de ellas es que al encontrarse cerca del suelo la actuación aerodinámica es menor. Otra desventaja es la que se mencionó anteriormente, la eficiencia de conversión de energía eólica a eléctrica es menor respecto de las turbinas con eje horizontal.

Las mediciones de la investigación diagnosticarán la viabilidad en la optimización del consumo de energía para utilizar este tipo de turbina eólica.

#### **7.1.4.1.2. Aerogeneradores de eje horizontal**

Según explica Dodero y García (2012), “en este caso, el eje de rotación es perpendicular a la dirección del viento, funcionando bajo el principio de desplazamiento transversal” (p. 20). Para Pinilla (1997), “los equipos eólicos de eje horizontal basan su principio de extracción de energía del viento en el fenómeno de sustentación que se presenta en alabes y formas aerodinámicas, tal como sucede con los perfiles en las alas de los aviones” (p. 27). También, Pinilla (1997), indica lo siguiente “algunos equipos eólicos de eje vertical basan su principio de operación en la fuerza de arrastre sobre superficies como es el molino de viento Savonius o el mismo principio de operación de los anemómetros de cazoletas” (p. 28). En estas turbinas, el movimiento del rotor se realiza lejos del suelo, la energía cinética se transmite al rotor del generador a través del eje y, si está disponible, a través de la caja de cambios. Convierte la energía rotacional en energía eléctrica.

Los rotores de eje horizontal pueden estar compuestos por una pala (monopala), dos palas (bipala) o tres palas (tripala). A medida que aumenta este número, disminuye la velocidad de rotación ya que cada

aspa genera una estela que afecta el rendimiento de la que le sigue. Para la generación de energía eléctrica son necesarias grandes velocidades de rotación, por lo tanto, es preferible un menor número de aspas. Además, estas, debido al desarrollo del perfil aerodinámico que poseen, pueden ser muy costosas. Sin embargo, los rotores monopala o bipala generalmente poseen problemas de balanceo, afectando en gran medida su rendimiento y dañando a la vez el rotor. Por ello, los rotores tripala son los más utilizados en la actualidad, al punto que se han convertido en el sistema más reconocible de aerogeneradores. En el mercado actual los generadores de eje horizontal son los que presentan mayores desarrollos, ocupando un 80% del total. (Dodero y García, 2012, p. 20).

Las turbinas eólicas con el eje horizontal son más eficientes, además, son versátiles y es la razón por la cual se tiene mayor posibilidad que se elija en este estudio.

## **7.2. Consumo Energético**

El consumo de energía en realidad se refiere a la conversión de energía en otra forma. En el uso general, por ejemplo, el requisito de energía para calefacción es igual a la preparación de agua caliente o para el uso de los dispositivos finales de cada persona.

Para Ramos y Riveros, (2018) la energía no se puede consumir en el sentido físico, ya que simplemente se convierte en otra forma de energía. Sin embargo, en cada una de estas conversiones, la energía finalmente se convierte en calor. Al poner como ejemplo una tostadora de pan, se deja claro cómo la energía eléctrica es convertida en calor para tostar una rebanada de pan. Generalmente, el término consumo de energía define el requisito de energía para

diferentes áreas de aplicación, como la calefacción o el enfriamiento de espacios, el agua caliente o la iluminación, siendo esta la energía que realmente se puede utilizar al final. Los combustibles fósiles aún satisfacen la mayor parte de las necesidades energéticas del mundo. Sin embargo, desde un punto de vista económico, la extracción de estas materias primas es cada vez más compleja. Se deben aprovechar las fuentes alternativas que utilicen las energías primarias para asegurar el suministro y la creciente demanda a largo plazo. Con la conversión de estas energías se obtiene la energía final que realmente se puede utilizar, aunque, siempre se asocia con pérdidas.

Para contribuir en la disminución de los gases causantes del efecto invernadero debido al uso de combustibles fósiles, es importante ahorrar en el gasto de energía reduciendo su consumo. Para lograrlo se puede hacer lo siguiente: “reducir las pérdidas que se producen en toda transformación o proceso, incorporando mejores hábitos de uso y mejores tecnologías”. Mentor (2007, p. 5).

El consumo de energía está inversamente relacionado con la eficiencia energética, a mayor consumo energético, menor es la eficiencia y viceversa, en el caso de los combustibles fósiles, la conversión también está asociada a las emisiones de CO<sub>2</sub>.

### **7.2.1. Energía eléctrica**

La energía eléctrica es la energía almacenada en un campo eléctrico o magnético que puede realizar trabajo sobre cargas eléctricas. Por ejemplo, hace brillar las lámparas de nuestras casas y los relámpagos en el cielo durante una tormenta. Foley (1983) explica que la energía eléctrica es la capacidad de la corriente eléctrica para realizar un trabajo mecánico, emitir calor o emitir luz, es

una forma de energía, uno de los trabajos mecánicos que puede realizar es la de hacer que los motores eléctricos realicen un trabajo.

La energía eléctrica no puede tomarse libremente, tiene que ser transformada, como se hace en las centrales de energía no renovable como las que utilizan carbón, petróleo, gas natural como fuente de energía primaria, mientras que hay centrales que utilizan fuentes de energía renovable como lo son las hidroeléctricas, plantas solares, eólicas como fuentes de energía primaria. Indica Dorf (1997), “La energía es la capacidad de realizar un trabajo” (p. 19). Como toda forma de energía, según Dorf (1997), “la unidad fundamental de la energía eléctrica es el joule (J)” (p. 19). En el campo técnico, también se usa a menudo la unidad vatio por segundo. Para los cálculos, puede utilizar estas relaciones entre las unidades joule (J), voltio (V), amperio (A), segundo (s), culombio (C) y watt (W):

$$1\text{J} = 1\text{AV} = 1\text{CV} = 1\text{Ws}$$

Los dispositivos electrónicos o electricos tienen como finalidad facilitarnos la vida, son parte de la vida moderna, pero, utilizan energía eléctrica para su funcionamiento. En la ubicación donde se realizará el estudio hay equipo electrónico de telecomunicaciones que utilizar energía eléctrica, se realizará un análisis para establecer su consumo.

#### **7.2.1.1. Voltaje**

Uno de los valores utilizados en electricidad y que nos servirá para comprender el presente estudio es el voltaje, se define como:

La tensión o voltaje es la presión eléctrica que se ejerce sobre la corriente, aspecto que varía entre sistemas eléctricos. En el sistema peruano, por ejemplo, el nivel de voltaje a nivel residencial es de 220 voltios, mientras que en los Estados Unidos el voltaje a nivel residencial es de 120 voltios. (Manhualaya, 2021, p. 25)

Dorf (1997), indica que el voltio es la unidad SI derivada del potencial eléctrico con el símbolo de unidad V. El voltio lleva el nombre del físico italiano Alessandro Volta quien le dio el nombre a la unidad de la fuerza electromotriz. El voltaje eléctrico de un voltio entre dos puntos de un conductor de línea en un circuito cerrado está presente cuando la potencia de un vatio se convierte en una corriente estacionaria de un amperio entre estos dos puntos.

El voltaje forma parte de la potencia eléctrica la cual se verá más adelante.

#### **7.2.1.2. Corriente Eléctrica**

Se puede interpretar la corriente eléctrica como la razón de cambio del flujo de carga eléctrica respecto del tiempo. Se presenta otra definición de corriente eléctrica:

La corriente eléctrica se define como el movimiento ordenado y permanente de las partículas cargadas en un conductor bajo la influencia de un campo eléctrico; siendo el campo eléctrico la zona que rodea a las cargas, en el cual se pone de manifiesto atracciones o repulsiones sobre otras cargas. (Ramos y Riveros, 2018, p. 25).

La unidad de medida de la corriente eléctrica es el amperio en nombre de André Marie Ampere quien fue un físico y matemático inglés, el amperio está representado por la letra A. La representación de la corriente eléctrica es:

$$I = dq / dt$$

Donde:

$dq$  = diferencial de carga (Coulomb)

$dt$  = diferencial de tiempo (segundos)

La corriente eléctrica forma parte de la electricidad y del funcionamiento de los dispositivos eléctricos y electrónicos, así como de los que generan energía eléctrica. Es de importancia para el estudio.

### **7.2.2. Eficiencia Energética**

Una casa fresca en verano, una oficina cálida en invierno, un estadio iluminado por la noche son ejemplos de que la energía se utiliza para logra un beneficio específico, eso sí, dicho beneficio debe utilizarse con efectividad. Para Carretero y García (2012), la eficiencia energética se define como: “proporción u otra relación cuantitativa entre el resultado en términos de desempeño, de servicios, de bienes o de energía y la entrada de energía. Ejemplo: Eficiencia de conversión; energía requerida/energía utilizada; salida/entrada; valor teórico de la energía utilizada/energía real utilizada” (p. 18).

Mentor (2007) expone que la eficiencia energética ha probado mediante el acceso a electrodomésticos que utilizan menos electricidad para efectuar una función, vehículos que requieren menos combustible, bombillos y lámparas que utilizan un 25 % de energía en comparación con las antiguas. Se puede

ejemplificar la eficiencia energética con el siguiente ejemplo: al hervir un litro de agua a 100 °C en una olla destapada y otro litro de agua en una olla tapada, el agua hervirá más rápido en la olla tapada ya que guarda el calor, por lo que calentar el agua es más eficiente el uso de la olla tapada.

Eléctricamente, la eficiencia energética implica la menor utilización de electricidad para que un dispositivo realice un trabajo. En estos modernos tiempos los electrodomésticos y dispositivos electrónicos poseen una etiqueta que indica la clase de eficiencia energética del dispositivo, dicha inscripción proporciona información importante sobre consumo de energía del mismo y el grado de eficiencia. En la presente investigación se determinará si es posible hacer más eficiente el consumo energético en los equipos de una torre de telecomunicaciones al utilizar generación eólica.

#### **7.2.2.1. Potencia Eléctrica**

En términos simples, la potencia eléctrica se puede considerar como la energía producida o consumida por un dispositivo en un momento determinado. Chapman (1995), mencionó: “La potencia se mide, generalmente, en julios por segundo (vatios), pero puede expresarse también en pie-libras por segundo o en caballos de fuerza” (p. 7).

La expresión de la potencia eléctrica es:

$$P = V \cdot I$$

Donde:

V = voltaje (voltios)

I = corriente (amperios)

El conocimiento tanto de la potencia consumida por los equipos de telecomunicaciones, iluminación, sistema de aire acondicionado, como la

potencia generada por el aerogenerador elegido para la torre de telecomunicaciones hará que se alcance uno de los objetivos del presente estudio.

## 8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

RESÚMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Energía eólica

1.1.1. Definición

1.1.2. Viento

1.1.2.1. Tipos de viento

1.1.2.2. Variación del viento con la altura

1.1.3. Energía cinética del viento

1.1.3.1. Potencia del viento

1.1.4. Aerogenerador

1.1.4.1. Clasificación

1.1.4.1.1. Aerogeneradores de eje vertical

1.1.4.1.2. Aerogeneradores de eje horizontal

1.2. Consumo energético

1.2.1. Energía eléctrica

1.2.1.1. Voltaje

- 1.2.1.2. Corriente eléctrica
- 1.2.3. Eficiencia energética
  - 1.2.3.1. Potencia eléctrica

## 2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

- 2.1. Características del estudio
- 2.2. Unidad de análisis
- 2.3. Variables
- 2.4. Fases del desarrollo de la investigación
  - 2.4.1. Fase 1: Exploración bibliográfica
  - 2.4.2. Fase 2: Recolección de la información
    - 2.4.2.1. Conocer el potencial eólico disponible
    - 2.4.2.2. Construcción del gráfico de la potencia disponible
  - 2.4.3. Fase 3: Análisis de datos
  - 2.4.4. Fase 4: Elección de la turbina eólica

## 3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- 3.1. Energía Eólica Obtenida
- 3.2. Energía Eléctrica Generada
- 3.3. Análisis de la Información Generada

## 4. FACTIBILIDAD FINANCIERA

- 4.1. Costos de Inversión
- 4.2. Análisis Financiero

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

## **9. MARCO METODOLÓGICO**

### **9.1. Características del Estudio**

El presente estudio tiene un enfoque cuantitativo, ya que las variables son medibles y, por lo tanto, reflejarán un resultado numérico; el paradigma de la investigación es positivista, puesto que, el objetivo es determinar los parámetros de generación eólica que se pueden obtener en base a las mediciones de velocidad del viento.

El modelo adoptado será de diseño no experimental, pues las variables del estudio no serán manipuladas, éstas serán medidas tal y como ocurren en el lugar de estudio; además, será longitudinal porque la aplicación del instrumento de medición no se hará en una única ocasión, se realizará durante un período de 3 meses, tiempo en el que se medirá una de las características de la dimensional viento.

El presente estudio se considera de tipo cuantitativo descriptivo, pues busca evaluar en qué medida se optimiza el consumo energético en una torre de telecomunicaciones después de determinar la energía del viento y realizar un análisis, en este caso de generación eólica. El alcance de esta investigación no comprobará una hipótesis.

## 9.2. Unidades de Análisis

“Una población es un conjunto de todos los elementos que estamos estudiando, acerca de los cuales intentamos sacar conclusiones”. (Levin y Rubin, 2004, p. 10).

La población del presente estudio será conformada por el viento presente en la torre de telecomunicaciones y por los equipos que requieren energía eléctrica para su funcionamiento, entre los cuales se tienen: sistema de aire acondicionado, iluminación de la sala de equipos y exterior, balizas de navegación, equipo de comunicación celular, equipo de microonda para transporte de datos, equipos de transmisión de internet.

## 9.3. Variables

Las variables se describen a continuación:

Tabla I. **Tabla de Variables**

Variable	Definición Teórica	Definición Operativa
CONSUMO ENERGÉTICO	El consumo energético es el gasto total de la energía, y normalmente incluye más de una fuente energética. Lo asociamos al gasto de luz y de energía eléctrica, pero aquí entrarían también el gas, el gasoil o la biomasa. Además, el consumo de energía está conectado a la eficiencia energética. De esta forma, a mayor consumo energético, menor es la eficiencia, y, por lo tanto, menor es también el ahorro en las facturas.	Se realizará la medición del voltaje y de la corriente en los equipos de telecomunicaciones, iluminación, sistema de climatización utilizando un multímetro y un amperímetro de gancho. Con las mediciones obtenidas se utilizará la expresión de potencia para obtenerla.

Continuación tabla I.

GENERACIÓN EÓLICA	Para entender de dónde proviene la energía eólica hay que tener en cuenta, en primer lugar, al sol. Es la radiación solar quien, al calentar el aire, la tierra y el mar provoca que haya viento, elemento clave para generar este tipo de energía renovable. Cuando el aire está en movimiento produce energía cinética que es aprovechada por los aerogeneradores, instalados bien en la tierra o bien en el mar, para transformar el viento en electricidad y, por lo tanto, producir de manera sostenible esta fuente de energía.	Se realizará la medición de la velocidad del viento utilizando un anemómetro durante un período de 3 meses. El anemómetro se instalará en la parte superior de la torre de telecomunicaciones a una altura de 30 m. del suelo.
----------------------	---	--

Fuente: elaboración propia utilizando Excel®.

#### **9.4. Fases de Estudio**

El proyecto de investigación está dividido en cuatro fases, las cuales, se detallan a continuación.

##### **9.4.1. Fase 1: Exploración Bibliográfica**

En esta primera fase se revisará toda la bibliografía pertinente para la explicación del tema de estudio y con todos sus componentes.

Con esta información se formará la base para la explicación para la optimización de energía eléctrica utilizando generación eólica, sus variables principales y formas de poder realizarlo. Se recopilará información general sobre el lugar en estudio como lo es la ubicación, también, la altitud sobre el nivel del mar y las coordenadas geográficas.

#### 9.4.2. Fase 2: Recolección de la Información

Las mediciones de voltaje, corriente y el cálculo de la potencia consumida por los equipos en la torre de telecomunicaciones se realizarán de forma puntual en el sitio utilizando un voltímetro y un amperímetro. Para la medición de la velocidad del viento se utilizará un anemómetro, este anemómetro se colocará en la torre a una altura de 30 m. del suelo en uno de los herrajes de esta. En el lugar de instalación se debe considerar que no existan obstáculos que causen turbulencias al viento y que pudiese distorsionar la medición. Es importante evitar que el anemómetro esté cerca de cableados eléctricos que pudiesen interferir con las mediciones.

Los intervalos de cada medición serán de 10 minutos, posteriormente se promediarán para tener la velocidad promedio por hora. La descarga de la información se realizará a los 10 días.

Los equipos de medición y las variables se presentan en la siguiente tabla:

Tabla II. Equipos de medición, variables y unidades de medida

Variable	Equipo de Medición	Unidad de medida
Velocidad del viento	Anemómetro	Metros por segundo (m/s)
Temperatura ambiente	Termómetro	Grados Celsius (°C)
Dirección del viento	Veleta	Grados de rosa de los vientos

Fuente: elaboración propia utilizando Excel®.

### 9.4.2.1. Conocer el Potencial Eólico Disponible

En el presente estudio, se utilizará la técnica de medición de corta duración. Esta metodología consiste en efectuar una medición de velocidad del viento respecto del tiempo y se realizará con una duración de tres meses en el sitio donde se efectuará la evaluación del potencial eólico. Se medirá la velocidad del viento con un anemómetro en la torre de telecomunicaciones cuya altura, en primera instancia, debería ser igual a la altura del eje del aerogenerador que se instalará, además, se verificará la orientación del viento mediante una veleta. Se utilizará la tabla siguiente para anotar los promedios de velocidades y orientación del viento por hora:

Tabla III. **Tabla de Dirección y Velocidad del Viento**

Mes	Día	Hora	Dirección del Viento Promedio	Velocidad del Viento Promedio

Fuente: elaboración propia utilizando Excel ®.

### 9.4.2.2. Construcción del Gráfico de la Potencia Disponible

Se realizará la gráfica de la potencia disponible, para lo cual, se debe saber que una masa de aire en movimiento a una velocidad  $v$ , contiene energía cinética medida mediante:

$$E=1/2*M*v^2$$

Se observa que existe un flujo de energía por unidad de tiempo, o un potencial eólico que está disponible en un área A perpendicular a un flujo de aire con velocidad v, ésta será la corriente de energía cinética, es decir,

$$P_d=1/2*\rho*A*v^3$$

La potencia obtenida se encuentra en unidades del sistema inglés, ésta estará expresada en Watts. La representación gráfica de la potencia útil se encuentra en función del diámetro de la turbina, con la densidad  $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$

Definición Operacional de las variables utilizadas:

Energía (E): en Joules para todas las mediciones de energía cinética

Masa (M): en kilogramos para la masa del aire

Potencia Disponible ( $P_d$ ): en Watts indica la potencia incidente que tiene el viento en la turbina

Área (A): en metros cuadrados para el área del aire incidente

Densidad ( $\rho$ ): en kilogramos sobre metro cúbico del aire (aprox.  $1.2 \text{ kg/m}^3$ )

### **9.4.3. Fase 3: Análisis de Datos**

Los datos obtenidos del viento durante el período de tres 3 meses se tratarán estadísticamente, este procedimiento se hará para obtener el direccionamiento, orientación y distribución de frecuencia de las velocidades del viento. Ya que, el viento es aleatorio, se hará uso de las herramientas de la estadística descriptiva, obteniendo así, sus patrones de comportamiento. Posteriormente, se consultarán los datos meteorológicos del INSIVUMEH, con lo que se obtendrá la conducta del viento en el período de un año.

Debido a los constantes cambios del aire, es de especial importancia tener una distribución de este cuando llega la hora de instalar las turbinas eólicas, especialmente en lugares donde el terreno no es uniforme, también es importante para conocer la variabilidad direccional del viento ya que el sistema de orientación de la turbina debe responder a dichos cambios.

Existe una representación utilizada frecuentemente, ésta es la rosa de los vientos, la cual expresa en porcentaje el tiempo donde el viento presenta una dirección determinada. Normalmente, muestra una distribución las velocidades de viento distribuidas en intervalos direccionales, de la tabla IV se tomarán estos datos para realizar la gráfica.

Con el dato anual de la conducta del viento obtenidos del INSIVUMEH, se llenará la tabla siguiente con los datos estadísticos mensuales de este.

**Tabla IV. Datos estadísticos mensuales de velocidades del viento**

<b>Mes</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación Estándar</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>

Fuente: elaboración propia utilizando Excel ®.

Con la tabla tabulada, se podrá generar el gráfico mes vs. velocidad del viento. Esto permitirá obtener la potencia que puede obtenerse del viento mensualmente y, que podrá convertirse en energía eléctrica mediante una turbina eólica.

#### **9.4.4. Fase 4: Elección de la Turbina Eólica**

En esta fase, de acuerdo con lo encontrado en las anteriores, se habrá obtenido la intensidad, frecuencia, duración y dirección del viento en la torre de telecomunicaciones. Con dichos datos, se seleccionará una turbina eólica que funcione dentro de esos parámetros, ya que dichos equipos funcionan con velocidades del viento mínimas y máximas, por ejemplo, puede accionarse con velocidades de vientos de 3 m. por segundo o parar a una velocidad de 18 m por segundo. Las microturbinas serán las adecuadas, ya que, generan menos de 100 kw de energía eléctrica, por lo que, se analizarán los tipos de microturbinas y se elegirá la más adecuada para la generación eléctrica y que optimice el consumo energético en la torre de telecomunicaciones de Santa Elena Barillas.

## 10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

La información de los estudios previos será catalogada de acuerdo con los puntos en común en la realización del presente análisis de generación eólica que busca describir el comportamiento del aire en el lugar de la investigación y, por lo tanto, la densidad de la potencia del aire.

Para ello se utilizarán las siguientes herramientas:

- Tablas de la velocidad del viento
- Tablas de potencia disponible
- Diagrama de Rosa de los Vientos
- Diagrama de Distribución de Velocidades
- Diagrama de *Weibull*

Las herramientas estadísticas para utilizar serán:

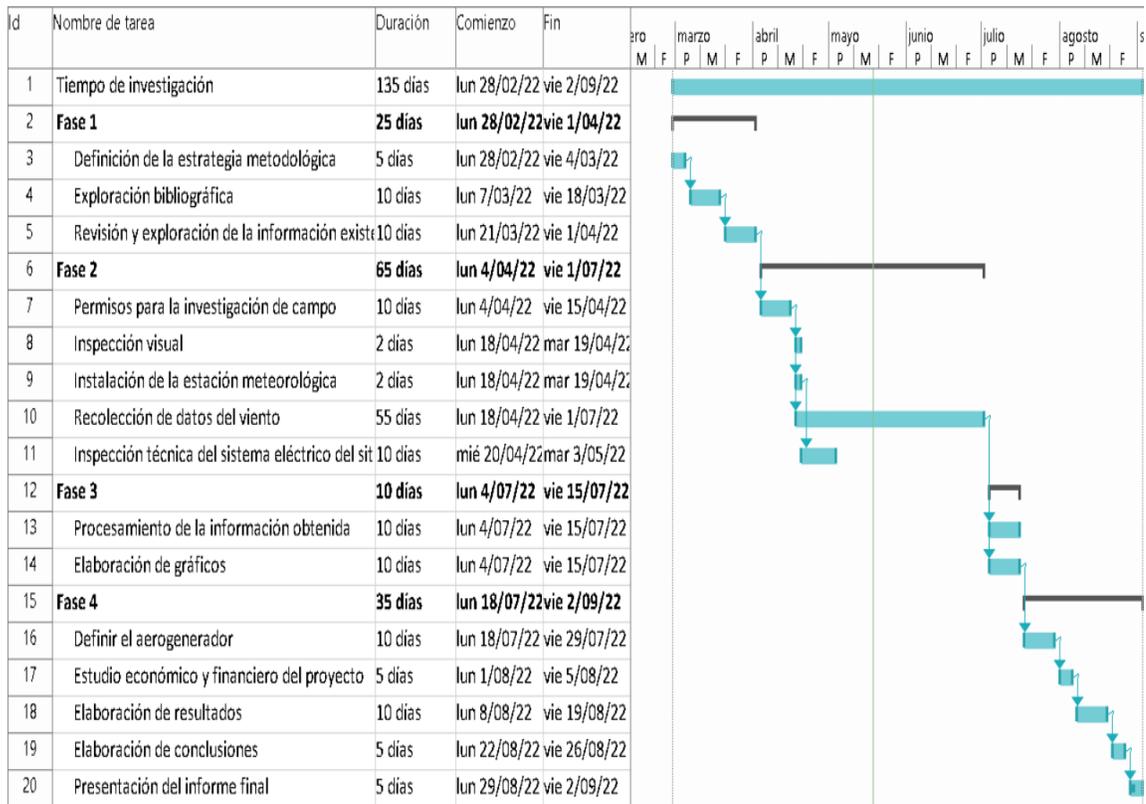
- Método de máximos y mínimos: aplicado a las velocidades del viento.
- Promedios y desviaciones estándar: en medición de la velocidad del viento y la obtención de un estimado de la energía que se espera del viento.
- Distribución estadística de Gumbel: para determinar la velocidad extrema del viento.

Con las herramientas anteriormente descritas, se podrá predecir el comportamiento del aire en un tiempo determinado, así como, la cantidad de energía eólica que se puede obtener, por lo tanto, es posible identificar cuanta energía eléctrica se obtendrá.



## 11. CRONOGRAMA

Figura 3. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia, utilizando Project ®.



## 12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Para la realización del presente trabajo de investigación se requieren recursos económicos, los cuales, serán sufragados por el estudiante de maestría. El presupuesto se distribuye de la siguiente forma:

Tabla V. **Recursos necesarios para la investigación**

<b>Recursos Humanos</b>				
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Total</b>
Asesor	Hora	30	Q83.33	Q2,500.00
Estudiante	Hora	185	Q100.00	Q18,500.00
Subtotal				Q21,000.00
<b>Insumos y Materiales</b>				
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Total</b>
Movilización para la toma de mediciones	Km	552	Q1.00	Q552.00
Anemómetro	Unidad	1	Q200.00	Q200.00
Estación meteorológica	Unidad	1	Q1,200.00	Q1,200.00
Computadora	Unidad	1	Q5,000.00	Q5,000.00
Resmas de hojas	Unidad	2	Q70.00	Q140.00
Cartuchos de impresora	Unidad	2	Q180.00	Q360.00
Imprevistos	Unidad	1	Q300.00	Q300.00
Materiales para asegurar la estación a la torre	Varios	4	Q25.00	Q100.00
Subtotal				Q7,852.00
<b>Infraestructura</b>				
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Total</b>
Permisos	Hora	12	Q0.00	Q0.00
Llaves de acceso al sitio	Hora	48	Q0.00	Q0.00
Escalera de 5 peldaños	Compra	1	Q250.00	Q250.00
Subtotal				Q250.00
<b>Total</b>				<b>Q29,102.00</b>

Fuente: elaboración propia, utilizando Excel ®.

Siendo los recursos aportados suficientes para la investigación, se considera que es factible la realización del estudio.

### 13. REFERENCIAS

1. Álvarez, C. (2006). *Energía Eólica*. España: IDAE.
2. Andrade Estévez, J. I., & Andrango Quisaguano, W. P. (2009). *Estudio para la obtención de la energía eólica para el sistema de comunicación del CALE.F.T. [Tesis de grado, Escuela Politécnica del Ejército]*. Repositorio institucional. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/4388>.
3. Do Nascimento Fernandez, J. (2006). *Generación Alternativa para Antenas Repetidoras de Telecomunicaciones Ubicadas en Zonas Remotas. [Tesis de grado, Universidad Simón Bolívar]*. <https://docplayer.es/12333165-Universidad-simon-bolivar-coordinacion-de-ingenieria-electrica-generacion-alternativa-para-antenas-repetidoras-de.html>.
4. Escobar Cando, E. R. (2012). *Estudio de factibilidad de un sistema de electrificación autónomo eólico para sistemas de telecomunicación en zonas rurales del callejón interandino del Ecuador. [Tesis de grado, Escuela Politécnica del Ejército]*. Repositorio institucional. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/5962>.
5. Esquivelzeta Rabell, F. M. (2010). *Análisis endorreversible de la disponibilidad de energía eólica. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma*

de México]. Repositorio institucional.  
<https://www.ier.unam.mx/~ojs/pub/Tesis/5.pdf>.

6. Fernández, Á. M. (2018). *Estudio sobre la relación entre infraestructuras de telecomunicaciones y sistemas de energía renovables [Tesis de grado, Universidad de Cantabria]*. Repositorio Unican, España.  
<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/14966/412442.pdf?sequence=1>.
7. Frye, J. (2006). *Performance-objective design of a wind-diesel hybrid energy system for Scott Base, Antarctica [Tesis de maestría, University of Canterbury]*. UC Research Repository.  
<http://hdl.handle.net/10092/1157>.
8. Hernández, J. (2007). *Energización y Adecuación de Estaciones Radio Bases Movilnet. [Tesis de grado, Universidad Simon Bolivar]*. Repositorio institucional. <https://es.scribd.com/doc/271036928/Energizacion-y-Adecuacion-de-Estaciones-Radiobases>.
9. Minas, M. d. (Noviembre de 2018). *Energía Eólica en Guatemala*.  
[https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2018/11/Energ%C3%ADa-E%C3%B3lica-en-Guatemala.pdf?\\_\\_cf\\_chl\\_jschl\\_tk\\_\\_=24ceee2db01fecc57d5347493910e2ac77668116-1599498206-0-AeFLNGL5y5nko2he-Mju0SZpgCTwlqeMGhHMXRAMbOgHDIRUPRILPvpgLphd5YWr8JTi rz4VZPU4XjdJ1BMbcpsqH](https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2018/11/Energ%C3%ADa-E%C3%B3lica-en-Guatemala.pdf?__cf_chl_jschl_tk__=24ceee2db01fecc57d5347493910e2ac77668116-1599498206-0-AeFLNGL5y5nko2he-Mju0SZpgCTwlqeMGhHMXRAMbOgHDIRUPRILPvpgLphd5YWr8JTi rz4VZPU4XjdJ1BMbcpsqH).

10. Mur Amada, J. (2011). *Curso de Energía Eólica. [Presentación de paper, Universidad de Zaragoza].*  
<https://www.windygrid.org/manualEolico.pdf>.
11. Padilla, N. (2017). *Implementación de un Sistema Renovable Alternativo para la Electrificación del Comando de la Guardia Nacional "Escuadrón Montado Guatopo", Ubicado en el Parque Nacional Guatopo del Estado Miranda. [Tesis de maestría, Universidad de Carabobo].* Repositorio institucional.  
<http://mriuc.bc.uc.edu.ve/bitstream/handle/123456789/4453/npadilla.pdf?sequence=1>.
12. Palomino Ramirez, H. (2015). *An economic assessment of micro-scale use of renewable energy sources : two case studies [Tesis de Maestría, University of Jyväskylä].* Repositorio JYX. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:ju-201510073332>.
13. Patricio Carreiras, J. M. (2013). *Sistemas híbrido de produção de energia para sistema de comunicações rádio [Tesis de Maestría, ,. Repositorio ipvct. Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Portugal.*  
<http://hdl.handle.net/20.500.11960/1202>.
14. Pinilla, A. (1997). *Manual de Aplicación de la Energía Eólica.* Bogotá: Universidad de los Andes y el Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas.  
[http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/energias\\_alternativas/material\\_difusion/manualE%F3licaweb.pdf](http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/energias_alternativas/material_difusion/manualE%F3licaweb.pdf).

15. Ramírez Grajeda, L. O. (2013). *Diseño De La Investigación Del Análisis De La Viabilidad De La Implementación De Un Sistema De Generación Híbrido Utilizando Energía Renovable Eólica y Solar [Tesis de grado, Universidad de San Carlos de Guatemala]*. Repositorio USAC. [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0193\\_ME.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0193_ME.pdf).
16. Ramos Ramos, E. D., & Riveros Arcaya, S. E. (2018). *Análisis de la Eficiencia Energética y Calidad de la Energía Eléctrica en la Planta Industrial de Procesamiento de Alimentos Agroindustriales CIRNMA S.R.L.en la Región Puno [Tesis de grado, Universidad Nacional del Altiplano]*. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/8910>.
17. Sears, F., Zemansky, M., young, H., Ereedman, R., & Lewis, A. (2009). *Física Universitaria* (12 ed.). Mexico: Pearson Education. <https://www.academia.edu/search?q=fisica%20universitaria>.
18. Sullins, E. J. (2006). *Analysis of radio communications towers subjected to wind, ice and seismic loadings. [Tesis de maestría, University of Missouri]*. Repositorio institucional. <https://hdl.handle.net/10355/4561>.
19. Thorstensson, E. (2009). *Small-Scale Wind Turbines Introductory market study for Swedish conditions. [Tesis de maestría, Chalmers University of Technology]*. Repositorio institucional. [http://space.hgo.se/wpcvi/wp-content/uploads/import/pdf/Kunskapsdatabas%20teknik/ovriga%20publikationer/Small-scale\\_Wind\\_Turbines\\_Erika\\_Thorstensson.pdf](http://space.hgo.se/wpcvi/wp-content/uploads/import/pdf/Kunskapsdatabas%20teknik/ovriga%20publikationer/Small-scale_Wind_Turbines_Erika_Thorstensson.pdf).

20. Valbuena, R. (2010). *Evaluación de Energías Renovables en Venezuela Aplicadas a las Estaciones Radiobases Movilnet*. [Tesis de especialización. Universidad Central de Venezuela]. Repositorio institucional. <https://docplayer.es/57395187-Evaluacion-de-energias-renovables-en-venezuela-aplicadas-a-las-estaciones-radio-bases-movilnet.html>.
  
21. Velasquez, J. (2013). Aportes en el desarrollo energético para America Latina. [Presentación de paper]. *Memoria II Simposio INternacional de Energía Eólica de Pequeña Escala*. Lima, Perú. <https://docplayer.es/17784222-Memoria-ii-simposio-internacional-energia-eolica-de-pequena-escala.html>.
  
22. Ventura, N., Zeballos, M., & Cataldo, J. (2009). Evaluación del Potencial Eólico de Montevideo. [Presentación de paper]. *The 8th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE*. Montevideo, Uruguay. <https://zdocs.mx/doc/evaluacion-del-potencial-eolico-de-monte-video-zwp9zq7vde15>.