

**DESARROLLO DE METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE UN SISTEMA
EÓLICO DE BAJA POTENCIA**

**JOSUÉ DAVID FONTALVO GUZMÁN
JUAN DANIEL SOTO PABÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2023

**DESARROLLO DE METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE UN SISTEMA
EÓLICO DE BAJA POTENCIA**

**JOSUÉ DAVID FONTALVO GUZMÁN
JUAN DANIEL SOTO PABÓN**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

**DIRECTOR
JULIÁN ERNESTO JARAMILLO IBARRA
INGENIERÍA TÉRMICA PHD**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2023

DEDICATORIA

¿Quién encerró el viento en sus puños?... Proverbios 30:4

Dedicado a mis padres David y Patricia, mi hermano Samuel y mi abuela y tíos.

A la memoria de mi abuelo Manuel.

JOSUÉ DAVID FONTALVO GUZMÁN

DEDICATORIA

Primeramente, quiero dedicarle este proyecto de grado a Dios, ya que sin el nada fuera sido posible. También a mi madre, quien es el motor de mi vida y que a pesar de todas las dificultades y obstáculos que tuvimos, nunca dejó de apoyarme e hizo hasta lo imposible para que yo culminara mi carrera profesional; a mi abuela a quien le debo igualmente la persona que soy hoy; a mi novia quien siempre estuvo dispuesta para apoyarme y darme animo en los tiempos difíciles, a la maravillosa Universidad Industrial de Santander en donde tuve la oportunidad de formarme como profesional y vivir una de las mejores etapas de mi vida, y a todos los demás miembros de mi familia, amigos y profesores que pusieron su granito de arena para que yo pudiera alcanzar esta meta tan importante en mi vida.

JUAN DANIEL SOTO PABÓN

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a Dios por darme inteligencia, sabiduría y permitirme la oportunidad de realizar este proyecto de manera satisfactoria. A mis padres y mi hermano por su apoyo incondicional, y por ser ese soporte emocional, económico y espiritual que hasta hoy me ha motivado a conseguir mis objetivos personales y académicos. Agradecer a mi abuela y abuelo (quien no alcanzó a ver materializado este proyecto) por su apoyo y por permitir desarrollar este proyecto en la Finca La Chabela. Agradecer a amigos y demás familia quienes me brindaron su apoyo y compañía.

Agradecimiento especial al profesor Dr. Julián Jaramillo quien nos animó y facilitó equipos necesarios para desarrollar este proyecto. Al profesor Omar Gelvez que nos acompañó y dirigió al inicio de esta tesis. Y a todo equipo de profesores de la Escuela de Ingeniería Mecánica UIS que nos aportó para el desarrollo de habilidades y conocimientos durante mi paso por el pregrado.

Agradecer también al Ingeniero Diego Noguera de Solaltec Ingeniería S.A.S quien apoyó este proyecto facilitando equipos necesarios para la instalación final.

JOSUÉ DAVID FONTALVO GUZMÁN

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar gracias a Dios en primer lugar, por darme la sabiduría y la capacidad de poder culminar este proyecto de grado y mis estudios profesionales, por darme la fortaleza para nunca desistir y así lograr alcanzar esta meta. A mi mamá, quien se esforzó siempre para que yo pudiera estudiar y quien me apoyo desde cero incondicionalmente. A mi abuela, quien con sus consejos y sus enseñanzas me hicieron la persona que soy. A mi novia, quien también me apoyo y me motivo siempre durante toda mi carrera para que no me rindiera y siguiera adelante. A mis demás familiares, amigos y seres queridos por hacer de este proceso un mejor camino y por darme la mano cuando los necesite. De todo corazón, gracias.

JUAN DANIEL SOTO PABÓN

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
2. JUSTIFICACIÓN	21
3. OBJETIVOS	22
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	22
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
4. MARCO TEÓRICO.....	23
4.1 ENERGÍA EÓLICA	23
4.1.1 Energía eólica en el mundo.....	24
4.1.2 Energía eólica en Colombia	24
4.2 EL VIENTO.....	28
4.2.1 Circulación del Viento.....	28
4.2.2 Influencia del Terreno.....	30
4.2.3 Velocidad del Viento y Ley de Hellmann.	31
4.3 POTENCIAL EÓLICO	33
4.3.1 Energía contenida en el viento.	33
4.3.2 Ley de Betz y coeficiente de potencia.	35
4.3.3 Relación de velocidad de punta o TSR.	37
4.3.4 Distribución de Weibull.	38
4.4 AEROGENERADORES	41
4.4.1 Partes de un aerogenerador.....	41
4.4.2 Funcionamiento de un aerogenerador.....	42
4.4.3 Tipos de Aerogeneradores.....	42
4.4.3.1 Aerogeneradores de Eje Horizontal o HAWT.	43

4.4.3.2 Aerogeneradores de Eje Vertical o VAWT.	44
4.4.4 Perfil Aerodinámico.	47
4.4.5 Curva de potencia de los aerogeneradores.....	49
5. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA A IMPLEMENTAR	51
6. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO, TOMA Y ANÁLISIS DE DATOS	53
6.1 ASPECTOS GEOGRÁFICOS DE LA ZONA DE ESTUDIO	53
6.2 SISTEMAS DE MEDICIÓN NACIONAL	55
6.3 MEDICIÓN EN EL SITIO.....	56
6.3.1 Descripción del equipo utilizado.	56
6.3.2 Instalación de la estación meteorológica.....	59
6.3.3 Análisis de los datos Obtenidos.	61
7. DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	71
8. ANALISIS TECNICO-ENONOMICO Y SELECCIÓN DEL AEROGENERADOR	82
8.1 SELECCIÓN DEL TIPO DE AEROGENERADOR	82
8.1.1 Variabilidad del viento.	82
8.1.2 Velocidad de arranque y velocidad nominal.	84
8.2 PRESELECCIÓN DE AEROGENERADORES	86
8.2.1 Aerogenerador TESUP Master X 1kW.	87
8.2.2 Aerogenerador Pikasola 400W.....	89
8.2.3 Aerogenerador Vertical Aeolos V-300W.....	90
8.3 ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO Y SELECCIÓN FINAL DEL AEROGENERADOR	92
9. ADQUISICIÓN, MONTAJE Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL AEROGENERADOR	103

10. CONCLUSIONES.....	120
11. RECOMENDACIONES	123
BIBLIOGRAFÍA	124

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Mapa de los poblados que aún se alumbran con velas en Colombia.....	19
Figura 2. Potencia eólica instalada en el mundo durante el periodo 2015-2019 [en GW].	24
Figura 3. Parque eólico Jepírachi.....	26
Figura 4. Atlas de viento y energía eólica en Colombia	26
Figura 5. Circulación global de los vientos	28
Figura 6. Circulación de vientos locales	29
Figura 7. Influencia del terreno en las corrientes de viento	30
Figura 8. Rosa de los vientos	31
Figura 9. Variación de la velocidad del viento (capa límite) con la altura sobre el terreno, según la ley exponencial de Hellmann	32
Figura 10. Ley de Betz	35
Figura 11. Potencial Eólico Real Aprovechable.....	36
Figura 12. Límite de Betz	37
Figura 13. Histograma de velocidad del viento.....	39
Figura 14. Partes de un aerogenerador	41
Figura 15. Aerogeneradores de eje horizontal.	43
Figura 16. Aerogeneradores de Eje Vertical.....	44
Figura 17. Rotor Tipo Savonius.....	46
Figura 18. Rotor Tipo Darrieus	47
Figura 19. Perfil aerodinámico de un aerogenerador	48
Figura 20. Curva de potencia de un aerogenerador de 11kw.....	50
Figura 21. Descripción general de la metodología propuesta en el presente proyecto.	51
Figura 22. Descripción específica de la metodología desarrollada e implementada durante la realización del presente proyecto.	52
Figura 23. Ubicación geográfica finca La Chabela.	53

Figura 24. Municipio La Cumbre.	54
Figura 25. Base de datos hidrometeorológicos IDEAM.	55
Figura 26. Estación meteorológica Davis® Vantage VueTM 6250.	57
Figura 27. Instalación estación meteorológica.	59
Figura 28. Datos obtenidos en el mes de enero.	61
Figura 29. Datos obtenidos en el mes de febrero.	62
Figura 30. Datos obtenidos en el mes de marzo.	63
Figura 31. Datos obtenidos en el mes de abril.	63
Figura 32. Datos obtenidos en el mes de mayo.	64
Figura 33. Datos obtenidos en el mes de junio.	65
Figura 34. Datos obtenidos en el mes de julio.	65
Figura 35. Superposición de datos marzo-abril.	66
Figura 36. Superposición de datos marzo-julio.	67
Figura 37. Superposición de datos enero-marzo.	67
Figura 38. Superposición de datos febrero-marzo.	68
Figura 39. Visualización de datos obtenidos en el software WeatherLink.	69
Figura 40. Datos obtenidos en formato archivo de texto(.txt)	70
Figura 41. Datos exportados a Microsoft Excel.	70
Figura 42. Ejemplo de resultados arrojados por el software WAsP Climate Analyst 3.1.	71
Figura 43. Crear nuevo proyecto en WAsP Climate Analyst.	73
Figura 44. Especificar nueva ubicación en WAsP Climate Analyst.	73
Figura 45. Ingresar coordenadas del sitio en WAsP Climate Analyst.	73
Figura 46. Agregar instrumento en WAsP Climate Analyst.	74
Figura 47. Agregar altura de instalación del instrumento en WAsP Climate Analyst.	74
Figura 48. Importar datos del viento hacia WAsP Climate Analyst.	75
Figura 49. Ejemplo archivo .txt de cómo se deben ingresar los datos del viento en WAsP Climate Analyst.	75
Figura 50. Organizar y consolidar datos en Excel en el formato necesario para ingresarlos al WAsP Climate Analyst.	76

Figura 51. Ejemplo de formato .txt para para ingresar los datos al WASP Climate Analyst.	77
Figura 52. Importación de datos a WASP Climate Analyst.	77
Figura 53. Ingresar valor de umbral de calma a WASP Climate Analyst.	78
Figura 54. Generar OMWC en WASP Climate Analyst.....	78
Figura 55. Resultados del potencial eólico obtenidos con ayuda del software WASP Climate Analyst, primera parte.	79
Figura 56. Resultados del potencial eólico obtenidos con ayuda del software WASP Climate Analyst, segunda parte.....	80
Figura 57. Ejemplo rosa de los vientos de la costa de Barcelona.	82
Figura 58. Aerogenerador TESUP Master X 1kW.	87
Figura 59. Curva de potencia Aerogenerador TESUP Master X 1kW.	88
Figura 60. Aerogenerador Pikasola 400W.	89
Figura 61. Curva de potencia Aerogenerador Pikasola 400W.....	90
Figura 62. Aerogenerador Vertical Aeolos V-300W.....	91
Figura 63. Curva de potencia Aerogenerador Vertical Aeolos V-300W.....	91
Figura 64. Gráfica y ecuación de potencia real generada en función de la velocidad del viento para el Aerogenerador TESUP Master X 1kW.....	93
Figura 65. Gráfica y ecuación y ecuación de potencia real generada en función de la velocidad del viento para el Aerogenerador Pikasola 400W.	94
Figura 66. Gráfica y ecuación de potencia real generada en función de la velocidad del viento para el Aerogenerador vertical Aeolos V-300W.....	94
Figura 67. Valor de la energía eléctrica en el departamento del valle del cauca para el año 2022.	98
Figura 68. Ejemplo de estimación del dinero que se puede ahorrar utilizando aerogeneradores, hecho por uno de los fabricantes y distribuidores de aerogeneradores en Colombia.	101
Figura 69. Adquisición del Aerogenerador Vertical Aeolos V-300W.....	104
Figura 70. Transporte del Aerogenerador Vertical Aeolos V-300W desde Bogotá a el sitio de instalación.	105

Figura 71. Ensamblaje del Aerogenerador Vertical Aeolos V-300W, primera parte.	105
Figura 72. Ensamblaje del Aerogenerador Vertical Aeolos V-300W, segunda parte.	106
Figura 73. Diagrama del sistema eólico recomendado por el fabricante.	107
Figura 74. Lugar adecuado para la instalación del sistema eólico.	110
Figura 75. Acople para el ensamble del aerogenerador en el poste.	110
Figura 76. Edificación de resguardo de los componentes del sistema eólico.	111
Figura 77. Proceso de montaje del aerogenerador en el poste.	112
Figura 78. Proceso de instalación de los componentes electrónicos del sistema eólico.	113
Figura 79. Revisión de los componentes del sistema eólico instalado.	114
Figura 80. Sistema eólico de baja potencia instalado.	115
Figura 81. Sistema eólico de baja potencia instalado en funcionamiento.	116
Figura 82. Comprobación del funcionamiento mediante la medición de carga de las baterías del sistema.	117
Figura 83. Lámparas en funcionamiento con la energía eólica aprovechada por el sistema instalado.	117

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Valores del exponente de Hellmann en función de la rugosidad del terreno.	32
Tabla 2. Características de los sensores.	58
Tabla 3. Intervalos de actualización de los sensores.	58
Tabla 4. Velocidad promedio horaria para un día tipo del sitio en estudio.	84
Tabla 5. Potencia real diaria generada del aerogenerador TESUP Master X 1kW.95	
Tabla 6. Potencia real diaria generada del aerogenerador Pikasola 400W.....	96
Tabla 7. Potencia real diaria generada del aerogenerador vertical Aeolos V-300W.97	
Tabla 8. Calculo estimado del dinero que sería posible ahorrar diaria y anualmente para cada aerogenerador.	99
Tabla 9. Resultados del análisis técnico-económico de los tres aerogeneradores seleccionados.....	100
Tabla 10. Precios y especificaciones de los componentes eléctricos necesarios para la instalación del sistema eólico.	108
Tabla 11. Costos del sistema eólico instalado.....	118

LISTA DE ANEXOS

(Los anexos están adjuntos y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS)

Anexo A. Datos recolectados por la estación meteorológica en formato de texto.

Anexo B. Datos recolectados por la estación meteorológica en formato Excel.

Anexo C. Datos organizados y consolidados en archivo Excel para ingresarlos al aplicativo WAsP Climate Analyst 3.1.

Anexo D. Datos organizados y consolidados en archivo de texto para ingresarlos al aplicativo WAsP Climate Analyst 3.1.

Anexo E. Resultados arrojados por el software WAsP Climate Analyst 3.1.

Anexo F. Documento Excel con todos los gráficos y ecuaciones de potencia de cada aerogenerador preseleccionado.

Anexo G. Archivo EES que contiene la tabla paramétrica usada para hacer los cálculos de potencia real.

Anexo H. Manual del aerogenerador vertical Aeolos V-300W.

Anexo I. Brochure de especificaciones aerogenerador vertical Aeolos V-300W.

RESUMEN

TÍTULO: DESARROLLO DE METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE UN SISTEMA EÓLICO DE BAJA POTENCIA*.

AUTOR: JOSUÉ DAVID FONTALVO GUZMÁN, JUAN DANIEL SOTO PABÓN**.

PALABRAS CLAVE: ENERGÍA EÓLICA, ENERGÍA ELÉCTRICA, AEROGENERADOR, TURBINA EÓLICA, ENERGÍAS RENOVABLES.

DESCRIPCIÓN:

Actualmente la mayoría de energía eléctrica que se produce en Colombia se obtiene a través de grandes hidroeléctricas que generan un gran impacto ambiental en los ecosistemas naturales y que definitivamente no son la solución a la problemática que viven miles de familias en Colombia que aún no cuentan con acceso a electricidad, ya que en muchas partes del país seguirán siendo inexistentes las líneas de energía eléctrica y a su vez la población nacional ira aumentando exponencialmente con el paso del tiempo, y con ella la demanda de energía. Una de las soluciones más viables a esta necesidad es la implementación de energías renovables como la energía eólica y la energía eléctrica, las cuales son amigables con el medio ambiente, son autónomas, representan un gasto mucho menor para estas familias y mejoraran considerablemente su calidad de vida.

Para el desarrollo de este proyecto se realizó inicialmente la medición de las variables del viento en el sitio por medio de la instalación de una estación meteorológica (Davis Vantage VUE) que fue habilitada por la Universidad Industrial de Santander, una vez obtenidos esos datos de las variables se prosiguió enseguida realizar el cálculo del potencial eólico del sitio con ayuda del software de código abierto WASP Climate Analyst 3.1. Después se realizó un análisis técnico-económico con el que se determinó cual era la turbina eólica más adecuada disponible en el mercado teniendo en cuenta estos factores y posteriormente se llevó a cabo la compra del equipo. Finalmente se realizó el montaje e instalación del sistema eólico y se puso en funcionamiento.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra. PhD en Ingeniería Térmica.

ABSTRACT

TITLE: METHODOLOGY FOR SELECTION OF A LOW POWER WIND SYSTEM*

AUTHOR: JOSUE DAVID FONTALVO GUZMAN, JUAN DANIEL SOTO PABÓN**

KEY WORDS: WIND ENERGY, ELECTRIC ENERGY, WIND TURBINE, RENEWABLE ENERGY.

DESCRIPTION:

Currently, most of the electrical energy produced in Colombia is obtained through large hydroelectric plants that generate a great environmental impact on natural ecosystems and that are definitely not the solution to the problems faced by thousands of families in Colombia who still do not have access to electricity, since in many parts of the country electric power lines will continue to be non-existent and in turn the national population will increase exponentially over time, and with it the demand for energy. One of the most viable solutions to this need is the implementation of renewable energies such as wind energy and electricity, which are friendly to the environment, are autonomous, represent a much lower cost for these families and will considerably improve their quality of life.

For the development of this project, the measurement of the wind variables on the site was initially carried out through the installation of a meteorological station (Davis Vantage VUE) that was enabled by Universidad Industrial de Santander, once these data were obtained from the variables, we immediately proceeded to calculate the wind potential of the site with the help of the open source software WAsP Climate Analyst 3.1. Afterwards, a technical-economic analysis was carried out with which it was determined which was the most suitable wind turbine available in the market taking into account these factors and later the purchase of the equipment was carried out. Finally, the assembly and installation of the wind system was carried out and it was put into operation.

*Degree work

**Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Julian Ernesto Jaramillo Ibarra. PhD in Thermal Engineering.

INTRODUCCIÓN

Actualmente en pleno siglo 21, Colombia aun es un país en el que no toda su población cuenta con un servicio de energía eléctrica, esto debido a diferentes factores como el difícil acceso a los territorios por la falta de transporte o vías en mal estado, falta de redes de interconexión, presencia de grupos armados al margen de la ley, corrupción y abandono del estado. Esta falta de conexión a la red nacional de energía hace que las personas que habitan estas zonas del país deban optar por otros métodos alternativos como el uso de iluminación por velas, plantas eléctricas que funcionan con combustibles fósiles y demás, que no son precisamente amigables con el medio ambiente y a su vez suponen un gasto mayor para estas familias.

Por estas razones recién mencionadas, se hace necesario que Colombia se una a la tendencia global de encaminarse por la implementación de las nuevas energías renovables y el aprovechamiento responsable de sus grandes recursos naturales; especialmente en estas zonas desconectadas en donde la energía eólica o la energía solar pueden ser una solución bastante viable y más económica que el método convencional. Este proyecto de grado busca fomentar el uso de la energía eólica en los lugares en donde las condiciones del viento lo permitan, por medio de e desarrollo e implementación de una metodología para la selección de un sistema eólico de baja potencia, el cual posteriormente se compró, instalo y se puso en funcionamiento.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según el periódico El Tiempo, en el año 2019 se registraron 1710 poblados situados en diferentes partes de Colombia que no tienen acceso a energía eléctrica y aun acuden a iluminación con velas u otros recursos. Esto se debe a que en estos lugares se hace difícil el transporte y la instalación de redes de energía eléctrica ya sea por su ubicación geográfica o diversos factores como la presencia de grupos armados al margen de la ley que constantemente atentan contra dichas instalaciones.

Figura 1. Mapa de los poblados que aún se alumbran con velas en Colombia.



Fuente: VIVAS, Julián. El mapa de 1.710 poblados que aún se alumbran con velas en Colombia. El Tiempo [página web]. [Consultado: 12 de enero del 2023]. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/los-lugares-que-aun-viven-sin-energia-electrica-en-colombia->

325892#:~:text=Según%20información%20del%20Ipse,%20los,Antioquia;%20y%20Miraflores,%20Guaviare.

Colombia es un país que cuenta con un potencial eólico considerable que podría dar solución a este problema, mejorar la calidad de vida de miles de familias que no cuentan con un servicio de energía eléctrica y a su vez minimizar el impacto medioambiental causado por las formas comunes de obtención de dicha energía.

El gran obstáculo es que el país no cuenta con un desarrollo significativo en el mundo de la investigación y construcción de la energía eólica, esto es debido a que en el país no se ha fomentado la implementación de estos sistemas a nivel residencial que puedan aprovechar esta energía renovable, algo muy lamentable ya que Colombia posee diversos puntos estratégicos donde el potencial eólico es altamente aprovechable.

También se debe tener en cuenta la falta de motivación por parte de los entes gubernamentales y otros prestadores de servicios hacia las personas, al no fomentar la generación, ya que para estos trae un mayor beneficio tener a los usuarios dependientes de una empresa privada que les venda la energía, aprovechándose del desconocimiento de las ventajas de los sistemas de energía renovables.

2. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto les brinda a las personas la oportunidad de poder implementar una nueva alternativa de obtención de energía eléctrica que sea amigable con el medio ambiente y a su vez de aprovechar el potencial eólico presente en la zona de interés. Además de esto, brinda la posibilidad a dichos actores de poder acceder a un servicio auto sostenible y rentable, que les permitirá disminuir sus gastos a largo plazo en materia de consumo de energía eléctrica y prestaciones de dicho servicio a una empresa de servicios públicos.

Otro aspecto no menos importante que le da soporte a esta idea es que por medio de este proyecto se espera fomentar el desarrollo y la investigación en este campo, que actualmente se encuentra muy poco explorado y estudiado en nuestro país, y a su vez generar una nueva idea de negocio como lo sería la implementación de una nueva metodología que permita seleccionar un sistema eólico para después realizar su montaje en una zona específica. Además, mediante este proyecto las personas podrán tener la opción de escoger otro tipo de energía renovable y amigable con el medio ambiente, ya que en la actualidad este campo se encuentra más enfocado hacia la generación de energía eléctrica por medio de sistemas de generación fotovoltaica.

Se concluyó que la forma más efectiva de impulsar e implementar la generación de energía eléctrica mediante la energía eólica es proporcionar una metodología que permita realizar la selección de un sistema eólico de baja potencia haciendo uso de los equipos disponibles en el mercado, para lograr obtener como resultado un sistema de alta eficiencia en la producción de energía eléctrica.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Contribuir a la misión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander de promover el aprovechamiento racional de la energía y la conservación de los recursos naturales mediante el desarrollo de una metodología para la selección de un sistema eólico de baja potencia.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar una metodología que permita determinar la viabilidad para implementar un sistema eólico en una localidad. Para lo cual se deberán considerar los siguientes aspectos:
 - Técnica para determinar y organizar las variables que definen la potencialidad del recurso eólico del sitio.
 - Factores a considerar para la selección del tipo de aerogenerador que sea el más adecuado teniendo en cuenta los datos de potencial eólico obtenidos.
 - Realizar un análisis técnico-económico que permita determinar el aerogenerador más viable económicamente basado en la estimación diaria de producción de energía.
- Seleccionar y adquirir un aerogenerador disponible comercialmente que tenga una capacidad no mayor de 1 KW, teniendo en cuenta los criterios de: potencial eólico, disponibilidad comercial y factor económico.
- Realizar el montaje del aerogenerador adquirido.
- Mostrar la funcionalidad del sistema eólico instalado.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 ENERGÍA EÓLICA

Actualmente el planeta tierra se encuentra atravesando por una situación climática y ambiental bastante preocupante, debido a que con el pasar de los años la contaminación ambiental ha venido creciendo de manera alarmante, lo cual ha traído consecuencias devastadoras para todos los ecosistemas que habitan este, incluyendo a los seres humanos, y que parecieran ser irreversibles. Según la organización de naciones unidas¹ (ONU), la humanidad se encuentra en un momento decisivo, en el cual debe tomar la responsabilidad y trabajar conjuntamente para poder afrontar el cambio climático.

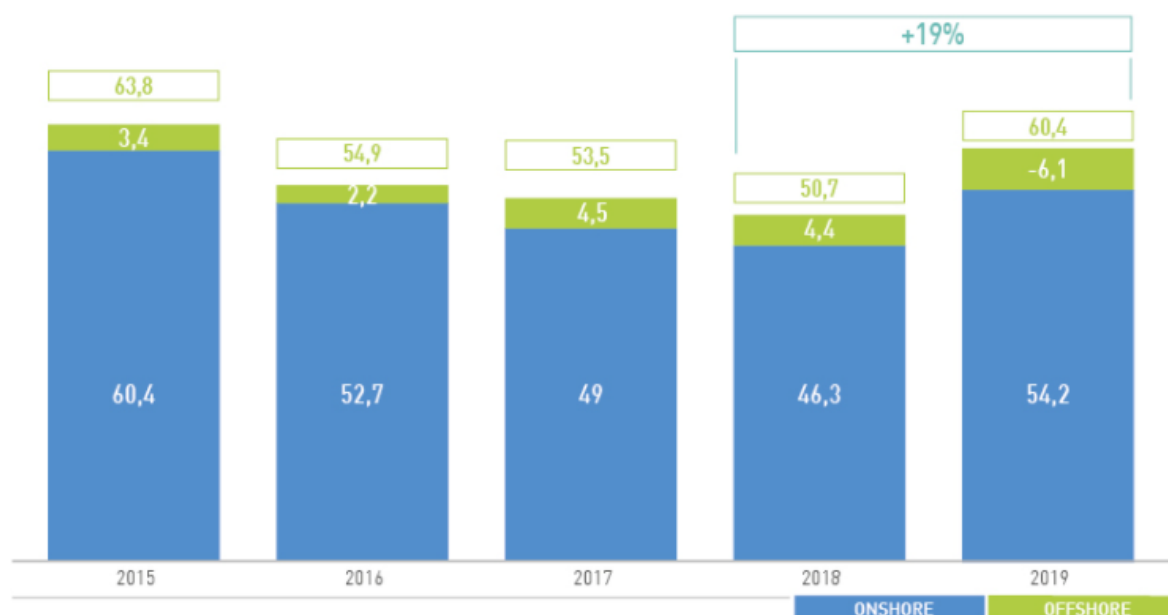
Una de las distintas formas que el ser humano ha encontrado para luchar y poder dar vuelta atrás a las repercusiones causadas por este fenómeno, es evitar el uso de combustibles fósiles que generan gran parte de la contaminación ambiental y promover el uso y la implementación de energías renovables, las cuales se basan en utilizar nuevos métodos de obtención de energía eléctrica que no sean agresivos con el medio ambiente. Para este fin, se utilizan diferentes recursos naturales como la luz solar, las corrientes de agua, la biomasa y el viento; siendo este último el centro de atención en este proyecto de grado. Desde hace muchos años atrás la energía eólica ha sido aprovechada por el ser humano para la automatización de distintas tareas como la molienda de alimentos y la extracción de agua, hoy día, la energía eólica tiene como finalidad aprovechar la energía cinética contenida en el viento para poder convertirla en energía eléctrica aprovechable; y actualmente se encuentra entre las energías renovables no convencionales más usadas en el mundo.

¹ NACIONES UNIDAS. Desafíos Globales Cambio Climático. [En Línea]. [Consultado: 12 de enero del 2021]. Disponible en: <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>

4.1.1 Energía eólica en el mundo. Según datos del Global Wind Energy Council (GWEC) la implementación de la energía eólica tuvo un aumento del 53% en el año 2020 y logro colocarse sobre los 743 GW, esto sitúa al 2020 como el mejor año en toda la historia para la industria de la energía eólica, ya que el aumento anual de esta fue de 93 GW².

Actualmente los países productores que encabezan la generación de energía eléctrica por medio del viento en todo el mundo son: China, Estados Unidos, Alemania, India y España.

Figura 2. Potencia eólica instalada en el mundo durante el periodo 2015-2019 [en GW].



Fuente: ASOCIACIÓN EMPRESARIAL EÓLICA. La Eólica En el Mundo. [página web]. [Consultado: 12 de enero del 2021]. Disponible en: <https://aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-el-mundo/>

4.1.2 Energía eólica en Colombia. Hoy por hoy, Colombia se encuentra en la búsqueda constante de la transición energética, en la cual se quiere lograr una migración gradual

² ASOCIACIÓN EMPRESARIAL EÓLICA. La Eólica En el Mundo. [página web]. [Consultado: 12 de enero del 2021]. Disponible en: <https://aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-el-mundo/>

de la producción de energía eléctrica desde los diferentes métodos convencionales, hacia las nuevas energías limpias. Aunque se han presentado diferentes obstáculos a lo largo del camino por lograr este objetivo, desde el gobierno nacional y diferentes sectores públicos y privados se viene incentivando notablemente el desarrollo de estas fuentes de energía.

Según atlas de vientos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)³ en Colombia existen diferentes puntos geográficos que cuentan con un gran potencial eólico que pueden ser aprovechables, siendo la zona de la costa atlántica y el mar caribe el lugar donde mayor es la incidencia del viento. Actualmente, el primer y único parque eólico que se encuentra activo y en funcionamiento pertenece a Empresas Públicas de Medellín (EPM), y es el parque eólico Jepírachi⁴, el cual está situado en el departamento de la Guajira y cuenta con 15 equipos que conjuntamente generan una potencia nominal eléctrica de 19,5 Megavatios (Mw).

En la actualidad la empresa Isagen, en conjunto con el grupo empresarial español Elecnor ya cuentan con un contrato formal aprobado para la construcción del segundo parque eólico en Colombia, llamado Guajira 1, el cual contará con 10 aerogeneradores y tendrá la capacidad de generar 20 megavatios (Mw) de energía eléctrica. Para llevar a cabo este proyecto se hizo necesaria una inversión de 37,63 millones de dólares⁵.

³IDEAM. Atlas interactivo de vientos [Consultado: 20 de enero del 2021]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>

⁴ EPM. Parque Eólico Jepírachi. [Consultado: 20 de enero del 2021]. Disponible en: <https://www.epm.com.co/site/home/nuestra-empresa/nuestras-plantas/energia/parque-eolico>

⁵ ¿QUÉ ES la energía eólica? Conoce un sector de gran futuro en Colombia. Lecciona Colombia [página web]. [Consultado: 20 de enero del 2021]. Disponible en: <https://www.lecciona.com.co/que-es-la-energia-eolica/>

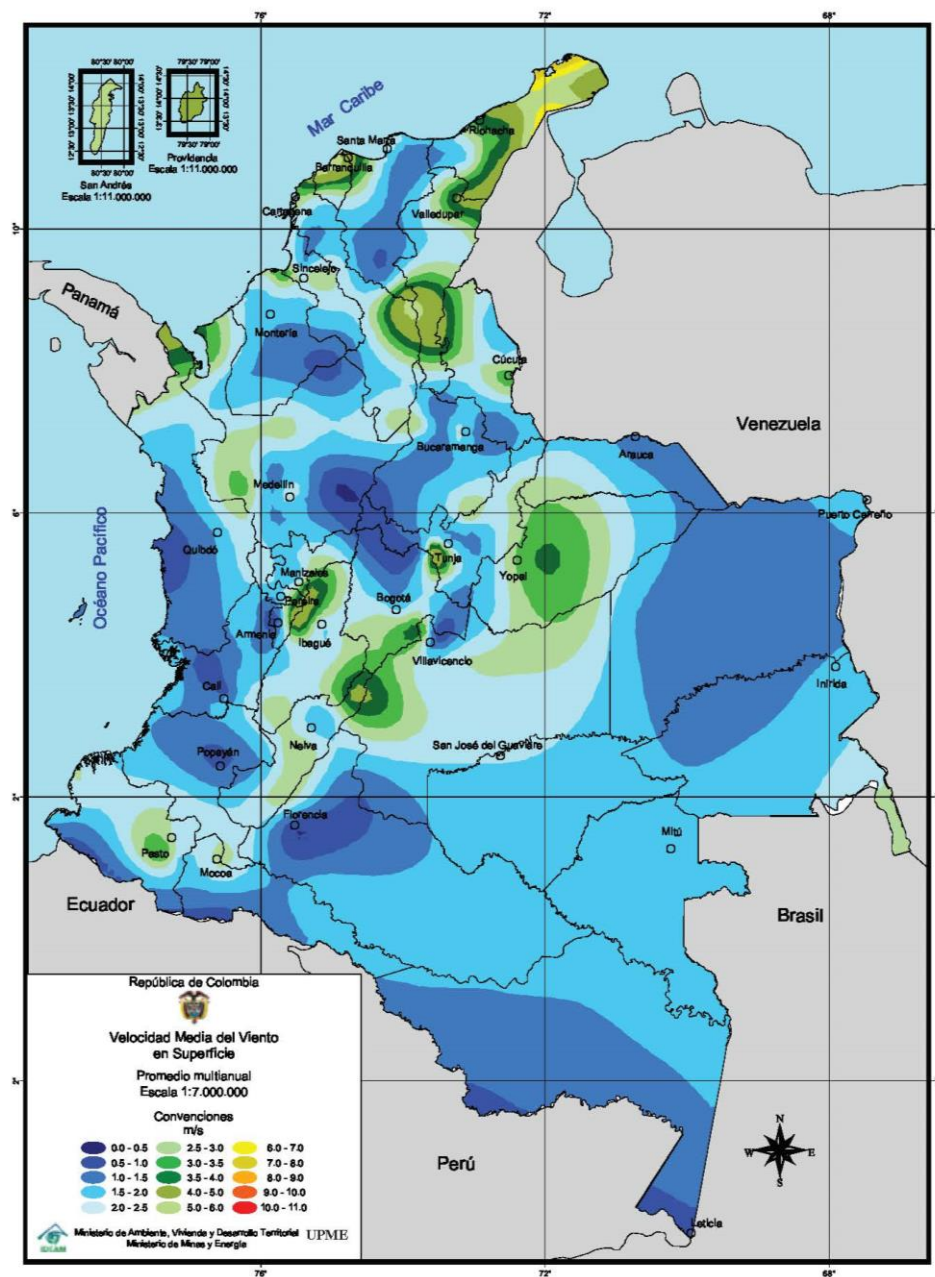
Figura 3. Parque eólico Jepírachi.



Fuente: www.epm.com.co

Como se puede observar en la información anterior, el departamento de la Guajira es una de las regiones con más potencial de crecimiento, pero no es la única en el país en la cual se pueden llevar a cabo buenos proyectos de energía eólica. Existen otras zonas al interior del país que cuentan con un buen potencial eólico y que no aparecen demarcadas dentro del atlas de vientos de IDEAM, debido a que no se cuentan con suficientes estaciones meteorológicas que monitoreen y cubran gran parte del territorio nacional; lo que se hace es utilizar los datos recogidos por las estaciones instaladas y realizar un análisis estadístico de estos para poder obtener un valor aproximado de datos en los otros lugares. Por eso, para poder determinar con mayor exactitud si un sitio en específico es apto o no para llevar a cabo un proyecto de energía eólica, es necesario realizar la medición del potencial eólico in-situ.

Figura 4. Atlas de viento y energía eólica en Colombia



Fuente: IDEAM. Atlas interactivo de vientos. [página web]. [Consultado: 20 de enero del 2021]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>

4.2 EL VIENTO

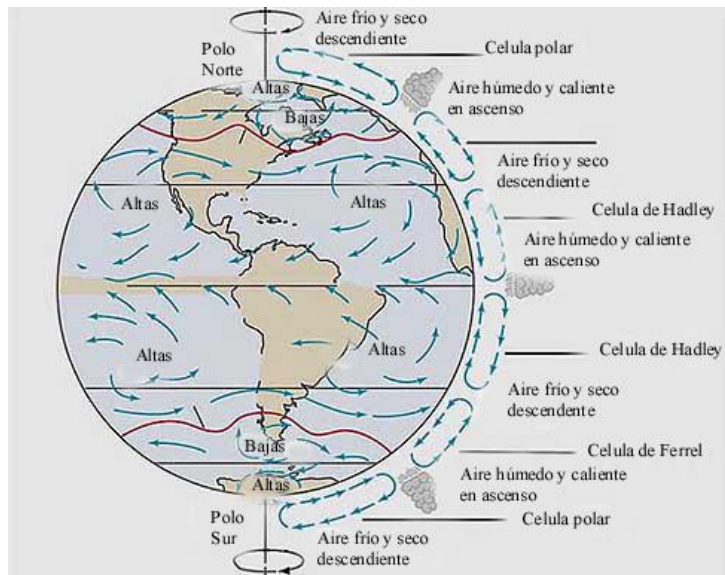
Como el viento es el principal recurso del cual se obtiene la energía para poder llevar a cabo el desarrollo de cualquier sistema de aerogeneradores, es importante estudiar y analizar su comportamiento, para así poder conocer como este afectaría el funcionamiento y la eficiencia de dichos equipos.

4.2.1 Circulación del Viento. La circulación del viento se puede analizar a grandes rasgos de dos formas, la circulación global y la circulación local.

El viento fluye de manera global en el planeta tierra debido a dos factores clave, que son la radiación solar y la rotación de este. Como el calentamiento de la superficie terrestre no se da de manera homogénea, las regiones cercanas al Ecuador y las regiones tropicales reciben una mayor cantidad de radiación solar en comparación a las zonas cercanas a los polos de la tierra, esto causa que se generen corrientes de aire caliente que viajan desde el ecuador y las regiones tropicales hacia los polos, y el aire frío de los polos se dirige hacia estos lugares. Estos grandes movimientos del viento a través del planeta también están influidos por la presión atmosférica, la fuerza gravitacional, la inercia del aire y la fricción con la superficie de la tierra⁶.

Figura 5. Circulación global de los vientos.

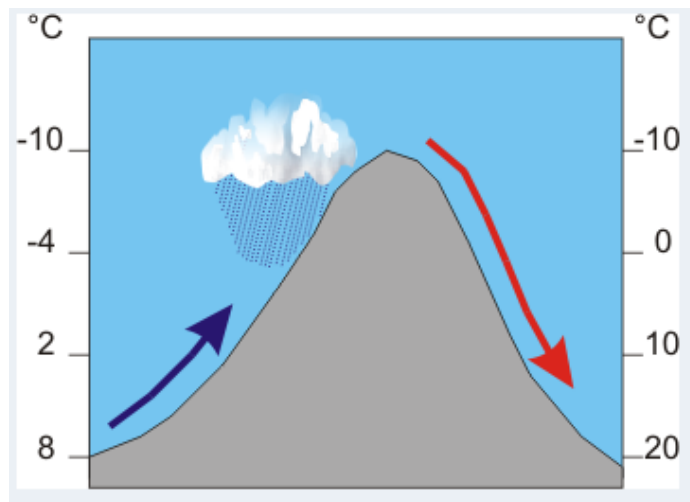
⁶ J. Manwell, Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. James Manwell, Jon McGowan, Anthony Rogers. Second Edition. John Wiley and Sons Ltd. 2009.



Fuente: LA MEMORIA DE LOS VIENTOS. EducaLAB [página web]. [Consultado: 21 de enero del 2021]. Disponible en: http://blog.intef.es/leer.es/WEB_MemoriadelosVientos/16circulacion.html

También existen otros factores que causan movimientos de masas de aires de forma local sobre sitios específicos, como las condiciones climáticas locales y las variaciones en la superficie de la tierra. Estas circulaciones de vientos locales pueden ser: vientos de brisa marina, vientos de valle-montaña, tormentas eléctricas, tornados, entre otros.

Figura 6. Circulación de vientos locales.

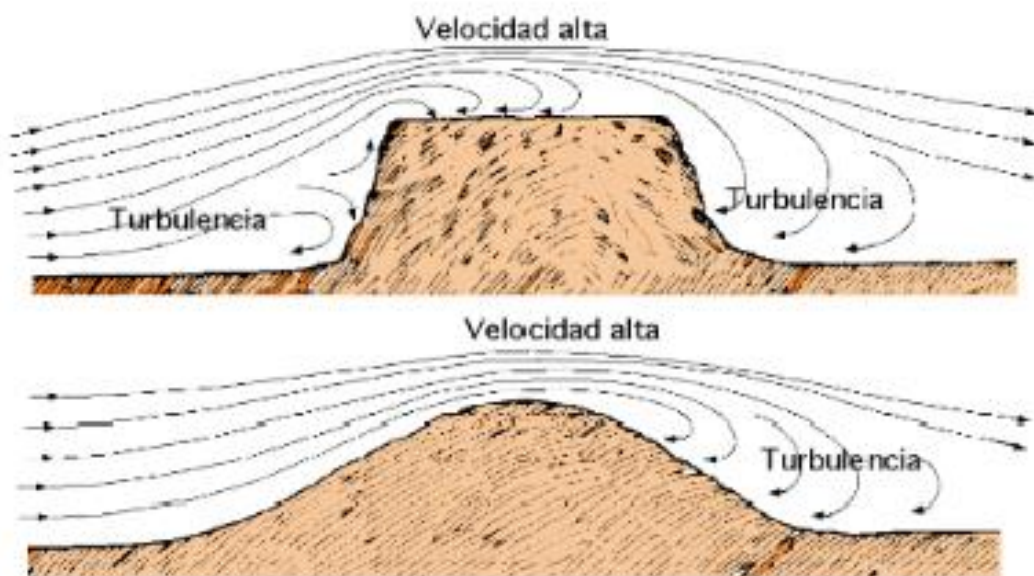


Fuente: LA MEMORIA DE LOS VIENTOS. EducaLAB [página web]. [Consultado: 21 de enero del 2021]. Disponible en: http://blog.intef.es/leer.es/WEB_MemoriadelosVientos/16circulacion.html

4.2.2 Influencia del Terreno. Uno de los factores que más afecta la velocidad y dirección de los vientos es la rugosidad del terreno, debido a que cuando las corrientes de aire son obstruidas por barreras, estas cambian su dirección de manera brusca.

La rugosidad del terreno hace referencia a las características geométricas y morfológicas del terreno por el cual fluye el viento. Es necesario tener en cuenta dichas características al momento de implementar un sistema eólico debido a que el suelo genera una fricción con las partículas del aire, lo que genera una diferencia de velocidades. Por estas razones se puede concluir que, entre más obstáculos encuentre el viento en su camino, habrá más turbulencia y cambiara su dirección, y entre más cerca de la superficie terrestre, menor será su velocidad debido a la fricción.

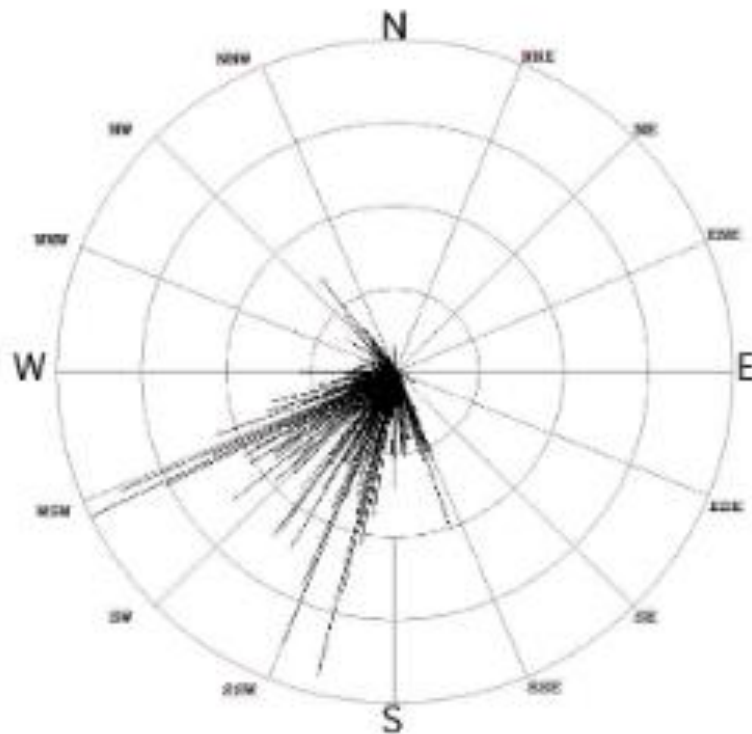
Figura 7. Influencia del terreno en las corrientes de viento.



Fuente: Fernández Díez, Pedro. Energía Eólica. [En Línea]. 2007. Capítulo 1 Fuentes Eólicas. [Consultado: 22 de enero del 2021]. Disponible en: <https://pfernandezdiez.es/es/libro?id=6>

4.2.3 Velocidad del Viento y Ley de Hellmann. Existen dos parámetros fundamentales que definen el comportamiento del viento, estos son su dirección y velocidad. Gracias al estudio de estos dos factores a lo largo del tiempo es que se puede realizar la llamada roza de los vientos.

Figura 8. Rosa de los vientos



Fuente: Fernández Díez, Pedro. Energía Eólica. [En Línea]. 2007. Capítulo 1 Fuentes Eólicas. [Consultado: 22 de enero del 2021]. Disponible en: <https://pfernandezdiez.es/es/libro?id=6>

El estudio de la velocidad del viento se basa en la ley exponencial de Hellmann, una ecuación de tipo estadístico la cual representa que la velocidad del viento varía con la altura y que a mayor altura mayor podrá ser la velocidad de este⁷.

$$V_h = V_{10} \left(\frac{h}{10} \right)^\alpha \quad (\text{Ecu. 1})$$

Dónde: V_h es la velocidad del viento a una altura h , V_{10} es la velocidad del viento a 10 metros de altura y α es el coeficiente de Hellmann que varía con la rugosidad del terreno.

Tabla 1. Valores del exponente de Hellmann en función de la rugosidad del terreno.

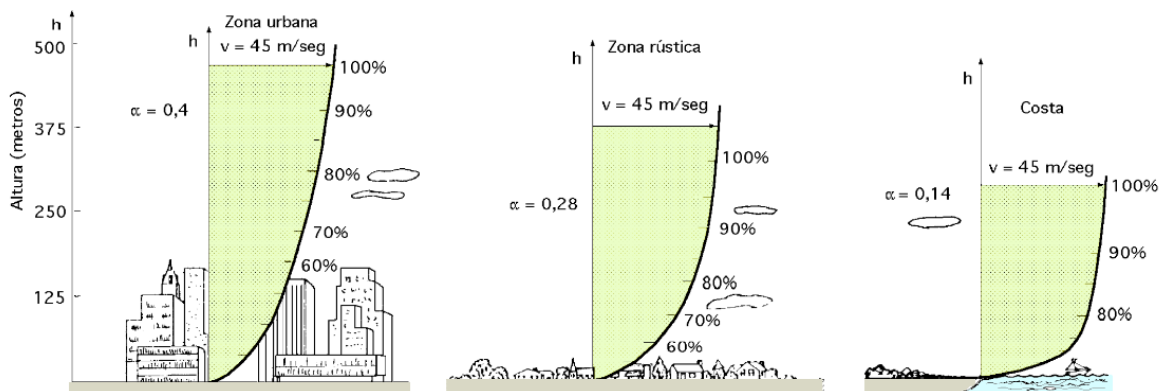
Lugares llanos con hielo o hierba	$\alpha = 0,008 \text{ a } 0,12$
Lugares llanos (mar, costa)	$\alpha = 0,14$
Terrenos poco accidentados	$\alpha = 0,13 \text{ a } 0,16$
Zonas rústicas	$\alpha = 0,2$
Terrenos accidentados o bosques	$\alpha = 0,2 \text{ a } 0,26$
Terrenos muy accidentados y ciudades	$\alpha = 0,25 \text{ a } 0,4$

Fuente: Fernández Díez, Pedro. Energía Eólica. [En Línea]. 2007. Capítulo 1 Fuentes Eólicas. [Consultado: 22 de enero del 2021]. Disponible en: <https://pfernandezdiez.es/es/libro?id=6>

A continuación, se muestra la figura 9 donde se ilustra como varía la velocidad del viento en función de la altura según la ley exponencial de Hellmann.

Figura 9. Variación de la velocidad del viento (capa límite) con la altura sobre el terreno, según la ley exponencial de Hellmann.

⁷ Fernández Díez, Pedro. Energía Eólica. [En Línea]. 2007. Capítulo 1 Fuentes Eólicas. [Consultado: 22 de enero del 2021]. Disponible en: <https://pfernandezdiez.es/es/libro?id=6>



Fuente: Fernández Díez, Pedro. Energía Eólica. [En Línea]. 2007. Capítulo 1 Fuentes Eólicas. [Consultado: 22 de enero del 2021]. Disponible en: <https://pfernandezdiez.es/es/libro?id=6>

4.3 POTENCIAL EÓLICO

4.3.1 Energía contenida en el viento. Para entender cómo se puede producir energía eléctrica por medio del viento, es necesario saber que esto no es más que un intercambio de energía, en el cual se aprovecha la energía cinética contenida en el viento para mover un sistema mecánico que convierte esa energía mecánica en energía eléctrica.

Sabiendo esto, se puede decir que, para poder obtener el potencial eólico contenido en el viento, primero se debe conocer la energía cinética por unidad de volumen de este.

$$E_c = \frac{1}{2} \frac{(m \cdot V^2)}{Vol} \quad (\text{Ecu. 2})$$

$$E_c = \frac{1}{2} R_o V^2 \quad (\text{Ecu. 3})$$

Donde E_c es la densidad de energía en [Watts/m³], R_o es la densidad del aire en [Kg/m³] y V es la velocidad del viento en [m/s].

Una vez teniendo esta ecuación, se debe tener en cuenta que, al momento de implementar un aerogenerador, esta energía cinética del viento solo actuara en un área

específica. Por esta razón se hace necesario expresar la densidad de potencia por unidad de área, ya que así es posible calcular la potencia que aprovecharan las aspas del sistema. Esta potencia se calcula multiplicando la densidad de energía (energía cinética por unidad de volumen) por el volumen del viento que atraviesa el área de las aspas [m³/s], es decir:

$$P_v = \frac{1}{2} R_o V^2 (AV) \quad (\text{Ecu. 4})$$

$$P_v = \frac{1}{2} R_o V^3 A \quad (\text{Ecu. 5})$$

$$P_{viento}(W) = \frac{1}{2} \rho V^3 A \quad (\text{Ecu. 6})$$

Donde P_v es la potencia del viento expresada en [Watts], R_o y ρ es la densidad del aire en [Kg/m³], V es la velocidad del viento en [m/s] y A es el área que abarcan las aspas del aerogenerador en [m²].

Analizando la ecuación de potencia del viento, es evidente que la variable que más impacto tiene sobre esta es la velocidad del viento, debido a que representa una función cubica en la ecuación. Con respecto a las otras variables como el área y la densidad del viento, se puede asegurar que, si afectan el resultado de la potencia, pero no superan la dominancia de la velocidad. En el caso de la densidad, es necesario tener en cuenta que la variación de esta en un lugar específico (ciudad, municipio, localidad) será mínima, ya que esta depende directamente de la altura del sitio con respecto al nivel del mar. Otro aspecto muy importante que se debe tener en cuenta de la ecuación de potencia del viento es que la velocidad del viento que se debe tomar para determinarla debe ser la velocidad media, debido a que no es muy práctico calcular la potencia para cada valor instantáneo de la velocidad del viento.

4.3.2 Ley de Betz y coeficiente de potencia. Teniendo claro cómo se calcula la potencia del viento y las variables que influyen en esta, es necesario pensar que los aerogeneradores como cualquier otro dispositivo mecánico, no tiene una eficiencia del cien por ciento (100%), Por lo cual no es posible asegurar que estos equipos conviertan toda la energía cinética contenida en el viento en energía eléctrica. Además, sería físicamente imposible que el rotor del aerogenerador convirtiera toda la energía del viento en energía mecánica, debido a que, si esto sucediera, la velocidad del viento a la salida del aerogenerador sería cero, lo cual ocasionaría que no entrara más aire al equipo y por ende que los rotores de este se detuvieran.

En el año 1919 un físico alemán llamado Albert Betz formulo en su libro llamado “Wind Energy” lo que hoy se conoce como “Ley de Betz”. Esta dice que existe una forma de frenar el viento en la cual se encuentre la eficiencia máxima en la conversión de la energía del viento en energía mecánica útil⁸. Este límite o factor en el cual se encuentra dicha eficiencia es definido por Betz como *Coeficiente de Potencia (C_p)*.

Figura 10. Ley de Betz.



⁸ ASOCIACIÓN DANESA DE LA INDUSTRIA EÓLICA. Ley de Betz. [En Línea]. [Consultado: 24 de enero del 2021]. Disponible en: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/betz.htm>

Fuente: ASOCIACIÓN DANESA DE LA INDUSTRIA EÓLICA. Ley de Betz. [En Línea]. [Consultado: 24 de enero del 2021]. Disponible en: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/betz.htm>

Según la ley de Betz, un aerogenerador de cualquier tipo o forma solo puede convertir un 59% de la energía cinética del viento en energía mecánica. Teóricamente este sería el valor del coeficiente de potencia máximo (C_p máximo) que se tendría, pero en la práctica no es así, ya que existen otros factores de rendimiento mecánico, aerodinámico y funcionamiento que se deben tener en cuenta al momento de calcular cuanta cantidad de energía es posible convertir.

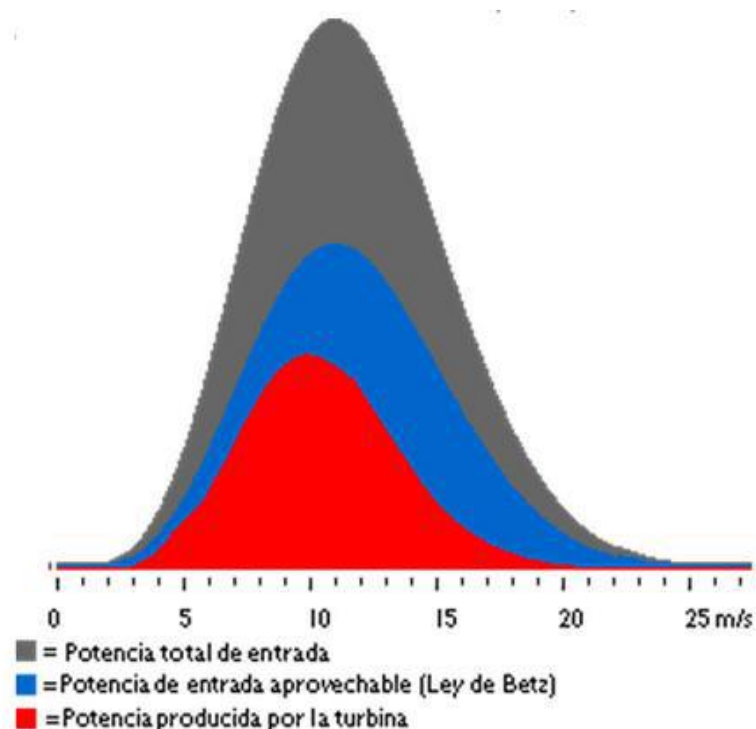
En conclusión, el coeficiente de potencia C_p es el resultado del producto entre el coeficiente planteado por Betz y los demás factores que representan las diferentes eficiencias que intervienen en el proceso de conversión de la energía. Teniendo esto claro, la ecuación de potencia del viento quedaría expresada de la siguiente manera:

$$P_{viento}(W) = \frac{1}{2} \rho V^3 A C_p \quad (\text{Ecu. 7})$$

$$C_p = \frac{P_{gen}}{\frac{1}{2} \rho V^3 A} \quad (\text{Ecu. 8})$$

Donde P_{gen} es la potencia del viento expresada en [Watts], ρ es la densidad del aire en [Kg/m³], V es la velocidad del viento en [m/s], A es el área que abarcan las aspas del aerogenerador en [m²] y C_p es el coeficiente de potencia del equipo entregado por el fabricante.

Figura 11. Potencial Eólico Real Aprovechable.

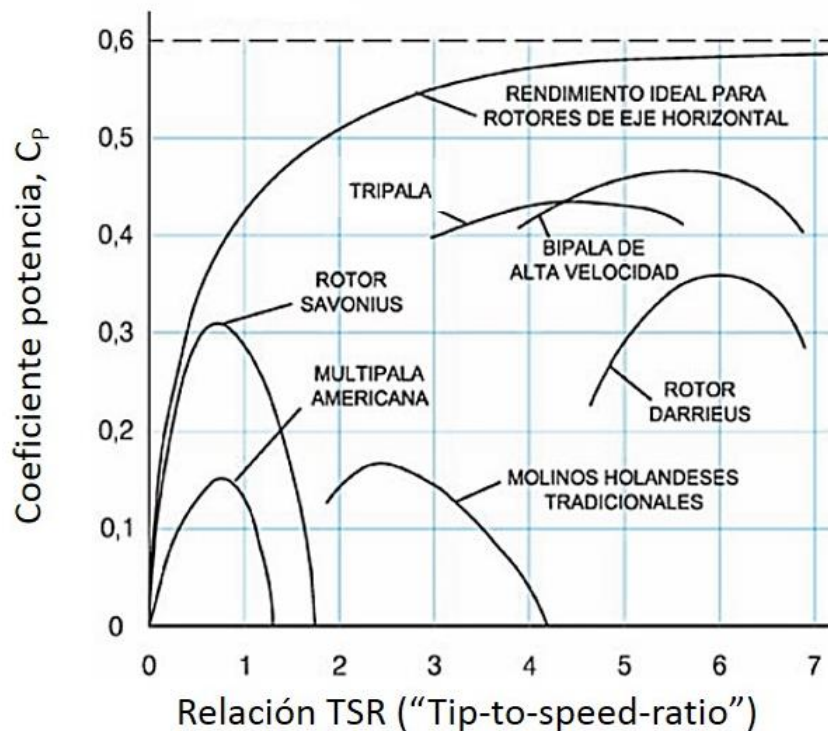


Fuente: ASOCIACIÓN DANESA DE LA INDUSTRIA EÓLICA. Función de densidad de potencia. [En Línea]. [Consultado: 24 de enero del 2021]. Disponible en: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/powdensi.htm>

4.3.3 Relación de velocidad de punta o TSR. Como se puede observar en la ecuación anterior, la velocidad del viento está directamente relacionada y es inversamente proporcional con el coeficiente de potencia, por esta razón se puede asegurar que a medida que varía la velocidad del viento también variara el coeficiente de potencia. Hoy día es muy común ver que el desempeño de los aerogeneradores es caracterizado por una gráfica que relaciona el coeficiente de potencia (C_p) y una velocidad llamada Tip Speed Ratio (TSR). Esta última está definida por la razón entre la velocidad del alabe y la velocidad del viento.

$$TSR = \gamma = \frac{R\omega}{V_{\infty}} = \frac{\text{Velocidad tangencial alabe}}{\text{Velocidad libre del viento}} \quad (\text{Ecu. 9})$$

Figura 12. Límite de Betz.



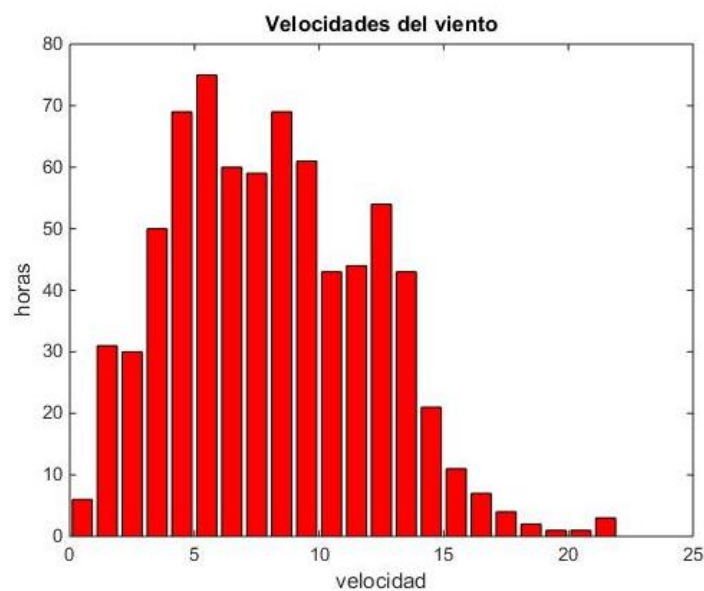
Fuente: LAS BASES CIENTÍFICAS DE LA ENERGÍA EÓLICA. Actualidad del sector eólico en España y en el mundo [página web]. [Consultado: 25 de enero del 2021]. Disponible en: <https://www.evwind.com/2018/07/06/las-bases-cientificas-de-la-energia-eolica>

4.3.4 Distribución de Weibull. La velocidad del viento es un recurso muy variable que no es posible predecir si no se cuenta con un historial de referencia o antecedente que lo permita, por esta razón se hace necesario realizar un análisis de datos estadístico, ya que la potencia del viento depende de los diferentes parámetros de este, y al presentarse variaciones en estos, dicho potencial también se verá afectado.

Para llevar a cabo cualquier proyecto que busque aprovechar la energía cinética contenida en el viento, es indispensable conocer y analizar las variaciones de la velocidad del viento para poder implementar un sistema con la mayor eficiencia posible y disminuir al máximo los costos de operación e inversión. Existen análisis estadísticos como la distribución de Weibull y Rayleigh que permiten describir las variaciones del viento presentes en una zona con un buen nivel de precisión.

Cuando ya se tiene el historial de datos del sitio donde se quiere implementar el sistema, se puede construir inicialmente un histograma de velocidades, el cual permitirá ver la frecuencia de ocurrencia de cada una de las velocidades del viento registradas durante un periodo determinado de tiempo. Este proceso es opcional, pero es de mucha utilidad al momento de dimensionar cuales son las velocidades de tiempo que más se repiten y así tenerlas en cuenta en la distribución de Weibull.

Figura 13. Histograma de velocidad del viento.



Fuente: MEDIDAS DE LA VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO. [página web].
 [Consultado: 25 de enero del 2021]. Disponible en:
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/datos/viento/viento.html>

En la figura 13 se puede observar un histograma del viento, en el cual se representan el número de horas (eje vertical) que se repite cada velocidad del viento (eje horizontal). Ejemplo: Las velocidades entre 4 m/s y 5m/s se repiten durante alrededor de 70 horas durante el tiempo que se llevó a cabo la medición de los datos.

Es necesario obtener un modelo que describa por medio de una función matemática continua las frecuencias de la velocidad del viento, y no por medio de tablas con valores

discretos. Como se dijo anteriormente, existen dos métodos para determinar la distribución del viento, la distribución de Rayleigh, la cual se utiliza cuando solo se tiene acceso a una única velocidad del tiempo promedio durante un periodo de tiempo (1año, 1 mes, etc...) y la distribución de Weibull, la cual es la más empleada por la industria de la energía eólica ya que esta tiene en cuenta datos de velocidades del viento durante un periodo específico y se tendrá mayor precisión en los resultados.

La distribución de Weibull de la velocidad del viento depende de dos factores importantes los cuales permiten determinar la probabilidad de ocurrencia de altas velocidades, que es donde se presenta la oportunidad de captar una mayor cantidad de energía. Estos factores son: el factor de forma Alpha (α) que puede variar de 1 a 3.6 e indica el grado de dispersión de los registros y el factor de escala Beta (β)⁹.

$$W(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{\beta}\right)^{\alpha}} \quad (\text{Ecu. 10})$$

En donde: $W(v)$ es la función de distribución de probabilidad Weibull para la velocidad del viento, V es la velocidad del viento, α es el parámetro de forma y β es el parámetro de escala. Al aplicar a la anterior ecuación una transformación de doble logaritmo se puede reescribir como:

$$L_n \left(L_n \left(\frac{1}{1 - W(v)} \right) \right) = \alpha L_n(v) - \alpha L_n(\beta) \quad (\text{Ecu. 11})$$

Para poder encontrar los parámetros α y β se debe realizar un ajuste lineal a la ecuación anterior, de la siguiente manera:

⁹ Eraso-Checa, F., Escobar-Rosero, E., Paz, D.F., y Morales, C. (2018). Metodología para la determinación de características del viento y evaluación del potencial de energía eólica en Túquerres-Nariño. Revista Científica, 31(1), 19-31. Disponible en: <https://doi.org/10.14483/23448350.12304>

$$y = \alpha x - b \quad (Ecu. 12)$$

Donde :

$$y = L_n \left(L_n \left(\frac{1}{1 - W(v)} \right) \right) \quad (Ecu. 13)$$

$$x = L_n(v) \quad (Ecu. 14)$$

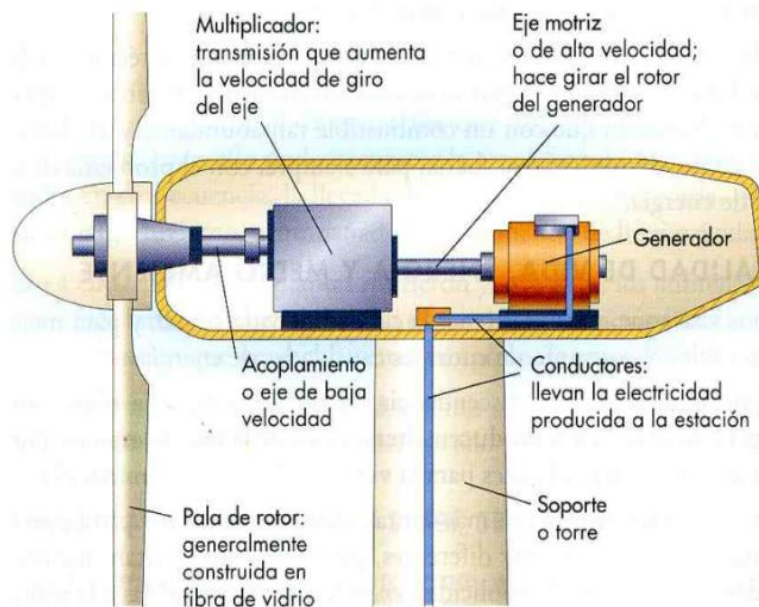
A partir de este ajuste lineal de la ecuación de la función de probabilidad acumulada de Weibull se pueden encontrar los parámetros α y β , en donde α es igual a la pendiente de la recta y β es igual al exponencial del cociente entre punto de corte de la recta en el eje Y y el factor de forma.

4.4 AEROGENERADORES

Un aerogenerador o turbina eólica es un dispositivo que tiene la capacidad de convertir la energía cinética contenida en el viento en energía mecánica, para finalmente ser convertida en energía eléctrica aprovechable.

4.4.1 Partes de un aerogenerador. Los aerogeneradores están conformados por diferentes sistemas que funcionando conjuntamente permiten lograr el objetivo final de transformar energía eólica en energía eléctrica. Estos sistemas son: el mástil o torre, el sistema rotativo, el multiplicador de velocidad (si lo tiene), el sistema de generación, el sistema de control y el sistema eléctrico. En algunos casos se llega a necesitar un sistema refrigeración en estos equipos, debido a que durante el proceso de conversión de la energía se disipa parte de esta en forma de calor.

Figura 14. Partes de un aerogenerador.



Fuente: AEROGENERADOR. MEDIDAS, POTENCIA, PARTES Y FUNCIONAMIENTO. [página web]. [Consultado: 1 de febrero del 2021]. Disponible en: <https://como-funciona.co/un-aerogenerador/>

4.4.2 Funcionamiento de un aerogenerador. Todos los aerogeneradores tienen el mismo concepto en cuanto al funcionamiento, lo que ocurre inicialmente es que el viento debido a la energía cinética que contiene hace girar las aspas del aerogenerador que se interponen en su camino y que poseen un perfil aerodinámico que ocasionan dicha fuerza giratoria. Posteriormente esta potencia angular es trasladada a una caja multiplicadora de velocidad por medio del eje principal, en donde se aumenta dicha velocidad hasta unas revoluciones establecidas. Una vez se ha llevado a cabo este proceso, el eje de salida de la caja multiplicadora se conecta al eje del generador eléctrico que se encarga de convertir la energía mecánica rotacional en energía eléctrica. Finalmente, dicha energía eléctrica es transportada por un sistema eléctrico que se encargara de su distribución hasta la zona de interés.

4.4.3 Tipos de Aerogeneradores. Los aerogeneradores se clasifican según la posición de su eje de rotación con respecto a la dirección del viento en dos grandes grupos:

Aerogeneradores de eje horizontal o HAWT por sus siglas en inglés (Horizontal Axis Wind Turbine) y de eje vertical o VAWT por sus siglas en inglés (Vertical Axis Wind Turbine).

4.4.3.1 Aerogeneradores de Eje Horizontal o HAWT. Estos tipos de aerogeneradores tienen su eje de rotación paralelo al suelo. Actualmente son los más utilizados en el sector de la energía eólica y en grandes proyectos como parques eólicos terrestres y marítimos, ya que son los más eficientes teniendo en cuenta su gran capacidad para generar energía eléctrica.

Figura 15. Aerogeneradores de eje horizontal.



Fuente: QUÉ ES UN AEROGENERADOR Y CÓMO FUNCIONA. Iberdrola [página web].
[Consultado: 1 de febrero del 2021]. Disponible en:
<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/palas-aerogeneradores>

Este tipo de equipos son fáciles de reconocer por la gran altura que suele tener su torre o mástil, ya que como sus aspas rotan en un plano perpendicular al suelo, el mástil debe tener una mayor longitud que estas, para así evitar que choquen con el suelo y que el viento se vea afectado por la rugosidad del terreno, también porque sus aspas están

ensambladas de tal forma que el viento choque primero con ellas antes que con el mástil, evitando generar turbulencias¹⁰.

Su mayor ventaja es que funcionan con ráfagas de vientos fuertes y poseen una inercia rotacional de gran magnitud debido al peso de las aspas. Algunas de sus desventajas es que su logística de transporte e instalación son bastante complejas, necesitan velocidades del viento altas para que funcionen, causan un efecto de interferencia en los radares, generan bastante ruido, su gestión de mantenimiento es compleja y riesgosa por la altura y necesitan un sistema de control ya que necesitan una orientación específica.

4.4.3.2 Aerogeneradores de Eje Vertical o VAWT. Estos tipos de aerogeneradores tienen su eje de rotación perpendicular al suelo y son más usados en el sector de la generación de baja potencia, debido a que funcionan a velocidades de viento más bajas. Además, a diferencia de los de eje horizontal, son de dimensiones más pequeñas y no están situados a grandes alturas.

Figura 16. Aerogeneradores de Eje Vertical



¹⁰ AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL. ArchiExpo [página web]. [Consultado: 1 de febrero del 2021]. Disponible en: <https://www.archiexpo.es/fabricante-arquitectura-design/aerogenerador-eje-horizontal-3856.html>

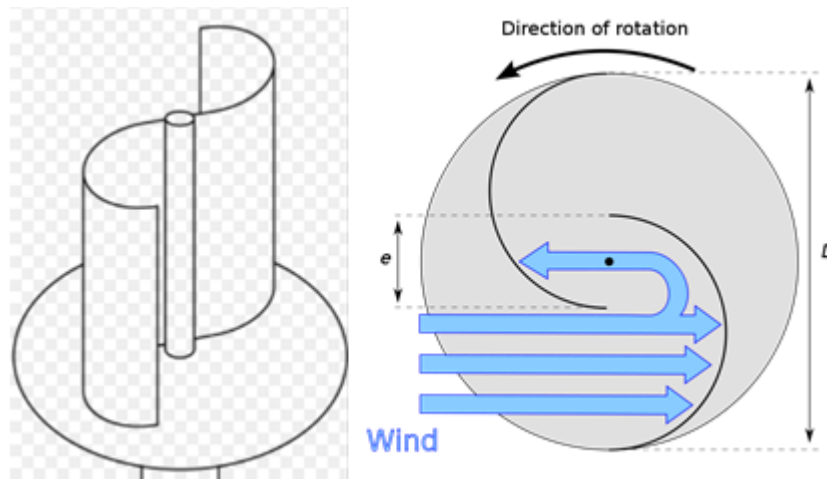
Fuente: AEROGENERADORES VERTICALES: partes, principio de funcionamiento, ventajas y desventajas. Eres Medio Ambiente [página web]. [Consultado: 1 de febrero del 2021]. Disponible en: <https://eresmedioambiente.com/aerogeneradores-eolicos-verticales/>

Los aerogeneradores de eje vertical poseen algunas características y ventajas con respecto a los aerogeneradores de eje horizontal, la más relevante de estas es que no necesitan un sistema de control para orientar las aspas del equipo ya que no importa la dirección de la cual provenga el viento, este siempre chocara de la misma forma contra las aspas; su diseño y fabricación es un poco más sencillo, el proceso de logística, transporte e instalación es mucho más fácil de llevar a cabo, su gestión del mantenimiento es menos compleja y arriesgada debido a su baja altura y tamaño, pueden ser implementados en sitios con velocidades del viento bajas-moderadas y en forma híbrida con otros tipos de energía renovable como paneles solares y no generan tanto ruido durante su funcionamiento. Algunas de las desventajas con respecto a los aerogeneradores de eje horizontal es que su rendimiento y capacidad de conversión de energía se encuentra muy por debajo de estos, y no poseen inercia rotacional significativa ya que su peso no interfiere en el movimiento.

Los aerogeneradores de eje vertical se pueden clasificar según el diseño de las aspas y el sistema de rotación en dos grandes tipos:

- **Savonius.** Son un tipo de aerogenerador de eje vertical inventado por un ingeniero finlandés llamado Sigurd J. Savonius. Su diseño principal consta de dos o más aspas en forma de semicilindros situados verticalmente y unidos al eje de rotación del equipo. Debido a la geometría de las aspas, estas experimentan una mayor resistencia aerodinámica en uno de sus lados, cual genera una diferencia de presiones que causa que el aerogenerador gire. La ventaja más destacada de este tipo de equipos es que trabaja con velocidades de viento muy bajas. Su principal aplicación se encuentra en la generación de energía para situaciones en las que se requiera una baja potencia.

Figura 17. Rotor Tipo Savonius.

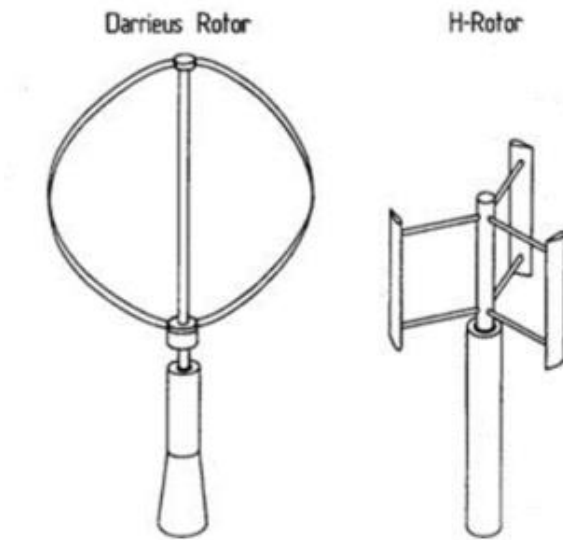


Fuente: ROTOR SAVONIUS. Wikipedia, la enciclopedia libre [página web]. [Consultado: 1 de febrero del 2021]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Rotor_Savonius

- **Darrieus.** Son un tipo de aerogenerador de eje vertical creado por el ingeniero G.J.M. Darrieus. Su diseño principal consta de una serie de palas de perfil aerodinámico curvos, los cuales están unidos al eje de rotación del aerogenerador. Estos aerogeneradores trabajan a partir de la fuerza de sustentación producidas durante la rotación. En la actualidad, el aerogenerador tipo Darrieus convencional con alabes curvos está siendo reemplazado por un nuevo aerogenerador tipo Darrieus con alabes rectos o también conocido como Darrieus H, los cuales tienen una sección transversal del perfil aerodinámico similares a los de un aerogenerador de eje horizontal. Este nuevo tipo de aerogenerador Darrieus generalmente tiene dos o tres alabes. Este tipo de aerogenerador es un poco más eficiente en la generación en comparación con el Savonius. Su principal aplicación se encuentra en la generación de energía para situaciones en las que se requiera una baja potencia¹¹.

¹¹TOBÍAS SALAS, Alfredo. RUBIO JIMÉNEZ, Carlos Alberto. Estado del arte de aerogeneradores de eje horizontal y vertical. [En Línea]. [Consultado: 6 de febrero del 2021]. Disponible en:

Figura 18. Rotor Tipo Darrieus.



Fuente: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/131197/Diagrama%20de%20un%20aerogenerador%20Savonius%20para%20uso%20domestico.pdf?sequence=1>

4.4.4 Perfil Aerodinámico. Las aspas o palas de los aerogeneradores están diseñadas con una forma y/o geometría especial que le permite tener un comportamiento aerodinámico específico y poder moverse lo más eficientemente posible. A esto se le llama perfil aerodinámico o perfil alar, y es la forma geométrica que se puede observar al realizar un corte transversal en las aspas de los aerogeneradores. Las partes fundamentales de un perfil aerodinámico son¹²:

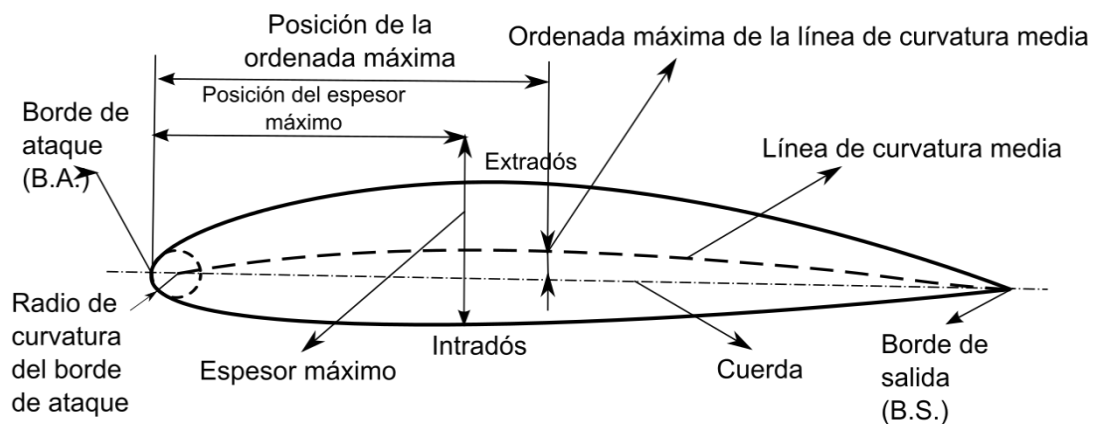
- **Borde de ataque:** Punto más avanzado del perfil, zona de incidencia del aire.
- **Borde de salida:** Punto más retrasado del perfil, zona de salida del aire.

<http://repositorio.ugto.mx/bitstream/20.500.12059/4745/1/Estado%20del%20arte%20de%20aerogeneradores%20de%20eje%20horizontal%20y%20vertical.pdf>

¹² GÓMEZ GARCÍA, Víctor. Estudio computacional de una turbina eólica de eje vertical H-Darrieus con perfiles NACA 4518. Valladolid España, septiembre de 2015. Grado en Ingeniería Mecánica. Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales. 2015. P. 8.

- **Cuerda:** Línea recta de unión entre el borde de ataque y de salida, cuya longitud caracteriza el perfil.
- **Línea de curvatura media:** Línea equidistante entre los dos bordes del perfil, si el perfil es simétrico esta línea es una recta.
- **Ordenada máxima de la línea de curvatura media:** Es la distancia máxima entre la línea media y la cuerda del perfil, en dirección perpendicular a la cuerda.
- **Posición de la ordenada máxima:** Distancia desde el borde de ataque al punto de ordenada máxima de la línea media.
- **Espesor máximo:** Máxima distancia entre los bordes del perfil, medida en dirección perpendicular a la cuerda.
- **Posición de espesor máximo:** Distancia desde el borde de ataque al punto de espesor máximo.
- **Extradós:** La cara del álabe donde existe una mayor velocidad y una menor presión.
- **Intradós:** La cara del alabe donde existe una mayor presión y una menor velocidad.

Figura 19. Perfil aerodinámico de un aerogenerador.



Fuente: GÓMEZ GARCÍA, Víctor. Estudio computacional de una turbina eólica de eje vertical H-Darrieus con perfiles NACA 4518. Valladolid España, septiembre de 2015. Grado en Ingeniería Mecánica. Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales. 2015. P. 8.

Los perfiles más utilizados son los normalizados NACA (Comité Consejero Nacional para la Aeronáutica) en su especificación de 4 dígitos¹³:

- El primer dígito expresa la ordenada máxima de la línea media como porcentaje de la longitud de la cuerda, en perfiles simétricos es cero.
- El segundo expresa la posición de la ordenada máxima de la línea media, en décimas.
- Los dos últimos expresan el espesor máximo como porcentaje de la longitud de la cuerda.

Ejemplo de nomenclatura: NACA 4518, se trata de un perfil asimétrico, con un espesor máximo de un 18% de la cuerda, una ordenada máxima de la línea media de un 4% de cuerda a un 50% de la longitud de la misma.

4.4.5 Curva de potencia de los aerogeneradores. Cada tipo de aerogenerador tiene una curva propia de potencia, esta curva indica la cantidad de potencia generada para cada uno de los equipos en relación con la velocidad del viento. Es importante reconocer y entender las curvas de potencia de los aerogeneradores ya que esta es una de las características más importantes al momento de seleccionar estos equipos. Existen cuatro puntos importantes que determinan la curva de potencia de los aerogeneradores¹⁴.

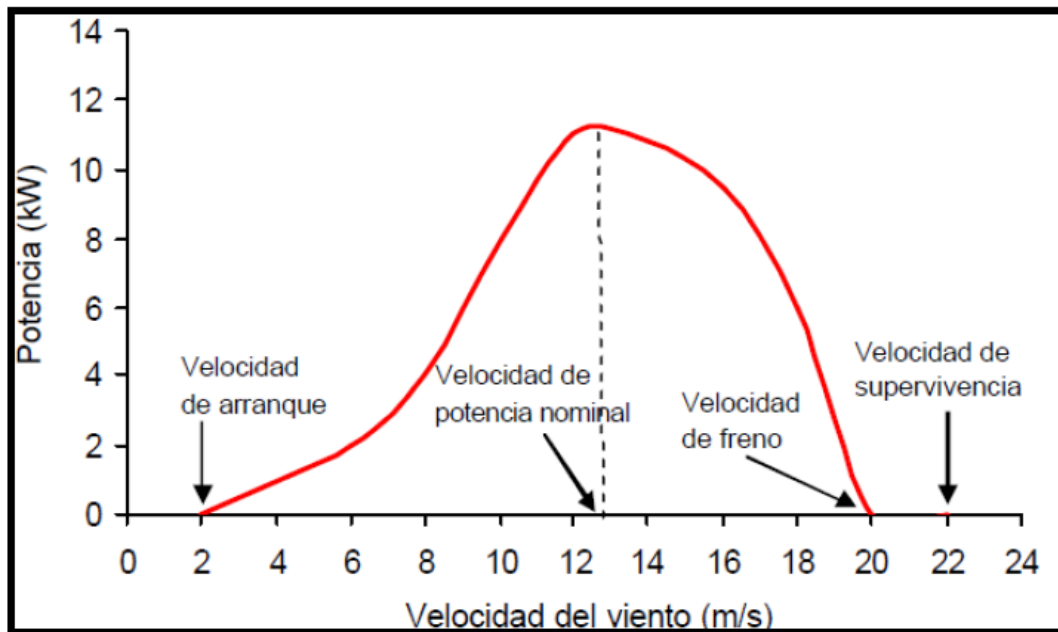
- **Velocidad de arranque:** velocidad del viento a partir de la cual el aerogenerador comienza a producir energía eléctrica.

¹³ GÓMEZ GARCÍA, Víctor. Estudio computacional de una turbina eólica de eje vertical H-Darrieus con perfiles NACA 4518. Valladolid España, septiembre de 2015. Grado en Ingeniería Mecánica. Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales. 2015. P. 8.

¹⁴ CIEMAT, ESPAÑA. AEROGENERADORES DE POTENCIA INFERIOR A 100 KW.

- **Velocidad nominal:** velocidad del viento en la cual el aerogenerador alcanza la potencia nominal. El tramo de curva ubicado entre la velocidad de arranque y la velocidad nominal sigue una ley no nominal respecto a la velocidad.
- **Velocidad de freno:** velocidad del viento a la cual el sistema de control hace que el aerogenerador se detenga para así evitar que el equipo sufra algún daño a causa de las altas velocidades.
- **Velocidad de supervivencia:** Velocidad del viento a partir de la cual el equipo comenzara a sufrir daños.

Figura 20. Curva de potencia de un aerogenerador de 11kw.



Fuente: CIEMAT, España. Aerogeneradores de potencia inferior a 100 kW.

En la figura 20 se ilustra una curva de potencia de un aerogenerador específico, donde se muestra cada uno de los puntos claves descritos anteriormente.

5. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA A IMPLEMENTAR

En este capítulo se busca explicar la metodología propuesta que permitirá determinar la viabilidad para implementar un sistema eólico en una localidad y seleccionar el aerogenerador de baja potencia más adecuado, tomando como datos de entrada las condiciones del viento presentes en el sitio de interés, la disponibilidad comercial y la viabilidad económica. Para poder implementar esta metodología propuesta, se deben contar con un sitio de interés en el cual se quiera implementar un sistema eólico de baja potencia que busque aprovechar la energía contenida en el viento y convertirla en energía eléctrica aprovechable y amigable con el medio ambiente. Una vez se tenga conocimiento del lugar, por medio de la metodología se podrá determinar si es viable implementar dicho sistema en este lugar, y si es el caso, también ayudara a determinar cuál aerogenerador será el más conveniente de instalar teniendo en cuenta la disponibilidad comercial y la viabilidad económica. Este proceso se puede observar de manera general en la Figura 21.

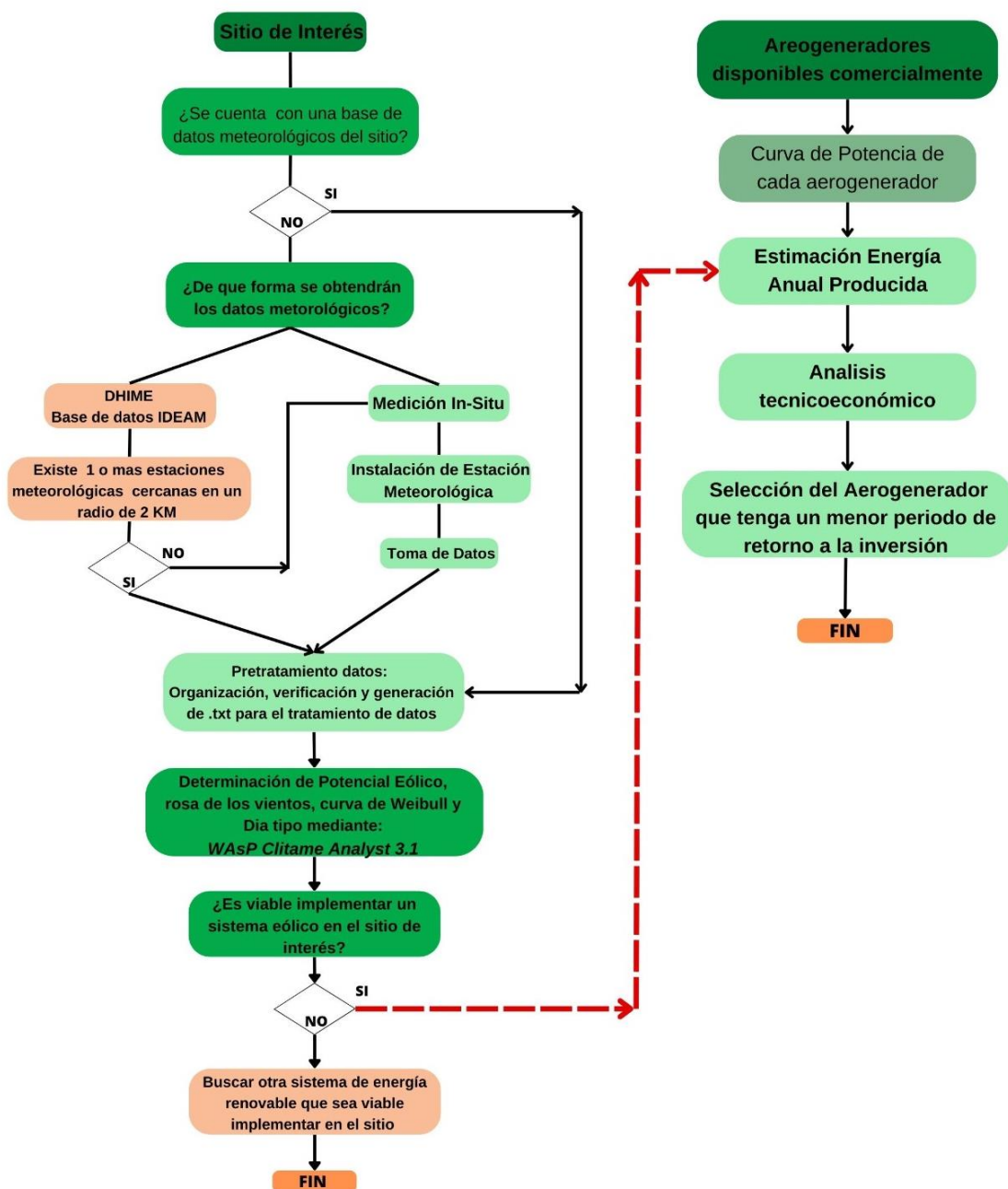
Figura 21. Descripción general de la metodología propuesta en el presente proyecto.



Fuente: Autores del proyecto.

En la Figura 22, se puede visualizar el diagrama de flujo que describe la metodología desarrollada e implementada durante la realización del presente proyecto de manera más específica.

Figura 22. Descripción específica de la metodología desarrollada e implementada durante la realización del presente proyecto.



Fuente: Autores del proyecto.

6. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO, TOMA Y ANÁLISIS DE DATOS

El desarrollo de este proyecto de grado se llevó a cabo en la Finca La Chabela, ubicada en la vereda pavitas, perteneciente al municipio de La Cumbre, Valle del Cauca, con coordenadas certificadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC):

- **Latitud:** 3° 39' 31.7640" N
- **Longitud:** 76° 33' 05.6794" W

Figura 23. Ubicación geográfica finca La Chabela.



Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Este proyecto de grado se llevó a cabo en este lugar en específico ya que los propietarios de la finca brindaron todo su apoyo desde el primer momento cuando se les hablo acerca del proyecto y siempre estuvieron dispuestos a colaborar en todos los aspectos.

6.1 ASPECTOS GEOGRÁFICOS DE LA ZONA DE ESTUDIO

El municipio de La Cumbre se localiza en las estribaciones de la Cordillera Occidental, al Suroccidente del Valle del Cauca a 1.590 msnm promedio donde la mayor parte del

territorio es montañoso en relieve; su temperatura promedio es 20°C y con una población aproximada de 14.000 habitantes. En el territorio hay pisos térmicos frío y templado donde sobresalen los Valles de Bitaco con una altura máxima de 1.470 msnm, Pavas con 1.560 msnm y Tapias que se extiende en dirección al Pacífico.

Figura 24. Municipio La Cumbre.



Fuente: Tomada por los autores de este proyecto.

La Cumbre está ubicado una región influenciada por las fallas Dagua-Calima y Roldanillo donde el 95,8% de las tierras del municipio presentan deposiciones de cenizas volcánicas, factor que limita el grado de fertilidad de sus suelos. El área municipal presenta una alta variabilidad en sus pendientes (800 a 2200 metros sobre el nivel del mar) lo que desfavorece las prácticas agropecuarias, pero a su vez genera mayores

corrientes de vientos. Son características del área de influencia del municipio las formas montañosas (rocas dominantes diabasas y basaltos), las formas colinadas (se destaca una peniplanicie de material volcánico) y las de origen aluvial, marino y lacustre¹⁵.

6.2 SISTEMAS DE MEDICIÓN NACIONAL

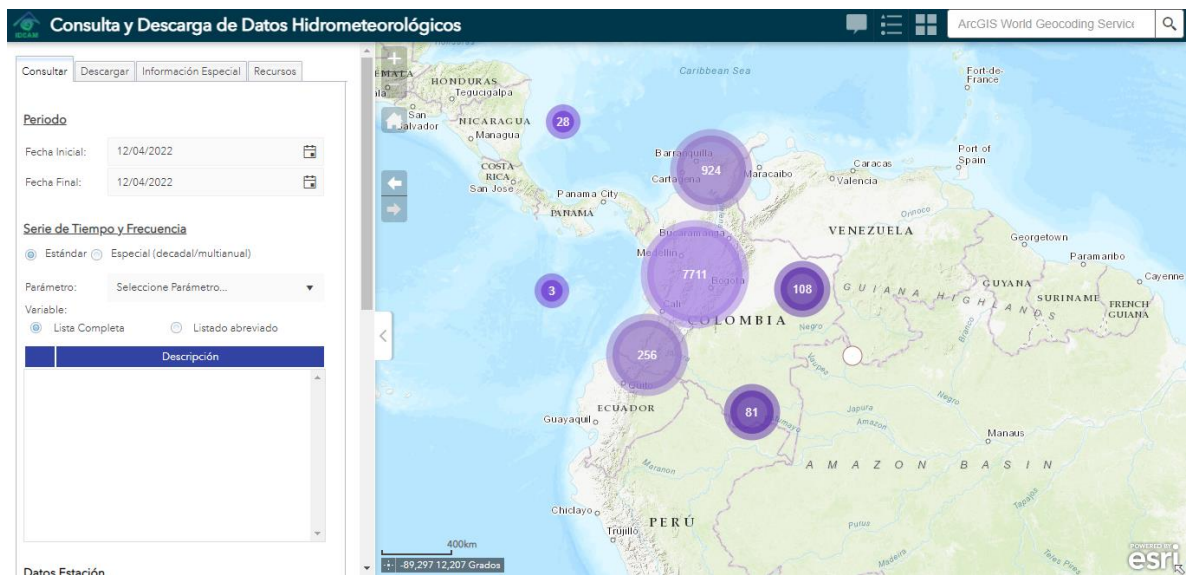
En Colombia existe un ente encargado de proporcionar los datos meteorológicos llamado Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el cual es una institución pública de apoyo técnico y científico al Sistema Nacional Ambiental, que genera conocimiento, produce información confiable, consistente y oportuna, sobre el estado y las dinámicas de los recursos naturales y del medio ambiente, que facilita la definición y ajustes de las políticas ambientales y la toma de decisiones por parte de los sectores público, privado y la ciudadanía en general¹⁶

Actualmente el IDEAM tiene a su disposición una red de estaciones meteorológicas que al año 2017 contaba con 2854 equipos dispersos por todo el país, de los cuales se puede obtener la información en el portal DHIME. Dicha información que brinda este ente es muy importante al momento de implementar sistemas de aprovechamiento de la energía eólica y sirve para identificar posibles zonas con un potencial aprovechable, pero no siempre son suficientes, debido a que para llevar a cabo un proyecto de este tipo de energía renovable se hace necesario contar con datos precisos sobre el lugar específico donde se implementara dicho sistema.

Figura 25. Base de datos hidrometeorológicos IDEAM.

¹⁵ UPME. Análisis área de estudio preliminar y alertas tempranas. BOGOTÁ D.C. Noviembre, 2017. [En Línea]. [Consultado: 20 de junio del 2021]. Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/ALERTAS-TEMPRANAS.pdf>

¹⁶ Fuente: IDEAM. Entidad. [página web]. [Consultado: 20 de junio del 2021]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/entidad/acerca-entidad>



Fuente: Fuente: IDEAM. Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos. [página web]. [Consultado: 20 de junio del 2021]. Disponible en: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

Debido a que en la fecha que se inició este proyecto no existía ninguna estación meteorológica cercana a el punto de interés de aplicación (finca La Chabela), se decidió realizar la toma de datos en el sitio por medio de una estación meteorológica que fue dispuesta por la Universidad Industrial de Santander. En la actualidad ya se tiene una estación meteorológica a unos 2km lineales aproximadamente que permite obtener datos de esta zona, aunque no se tuvieron en cuenta, debido a que la geografía del terreno es muy variable y esto genera que los vientos también lo hagan.

6.3 MEDICIÓN EN EL SITIO

6.3.1 Descripción del equipo utilizado. La estación meteorológica que facilito la Universidad Industrial de Santander por medio de su escuela de Ingeniería Mecánica fue la estación inalámbrica estación meteorológica Davis® Vantage Vue TM 6250 la cual recoge datos climáticos exteriores y los envía de forma inalámbrica a una consola Vantage Vue a través de radiofrecuencia de baja potencia. Esta estación meteorológica

inalámbricas Vantage incluye 2 componentes básicos: El conjunto integrado de sensores (ISS) que alberga y gestiona los sensores externos, y la consola que proporciona la interfaz de usuario, junto con la visualización de datos. El ISS y la consola Vantage Vue se comunican por radiofrecuencia. El canal por el que se transmite, es seleccionable por el usuario, lo cual permite que existan hasta 8 estaciones en la misma área geográfica (no a la misma consola).

Figura 26. Estación meteorológica Davis® Vantage VueTM 6250.



Fuente: INSAK. Estación inalámbrica Vantage Vue 6250. [página web]. [Consultado: 25 de junio del 2021]. Disponible en: https://www.insak.com.co/aym_image/files/03-ESTACI%c3%93N%20METEOROL%c3%93GICA%20DAVIS%20VANTAGE%20VUE%206250.pdf

La estación Vantage Vue contiene un colector de lluvia, sensor de temperatura y humedad, anemómetro, veleta y copas de viento. El sensor de temperatura / humedad está instalado en un escudo de radiación pasiva para minimizar el impacto de la radiación solar en las lecturas del sensor. La consola puede estar alimentada por baterías o por el adaptador de alimentación AC incluido con la consola. El ISS inalámbrico es alimentado por energía solar con un respaldo de batería (no es recargable) en casos de baja radiación solar o nula. La descarga de datos y la interacción con el computador se realiza

desde el software WeatherLink y se requiere Datalogger (6510, 6510SER, 6555). Para realizar transmisión de datos a internet se puede realizar con Vantage Connect (6622S) o Datalogger IP (6555)¹⁷. Otras de las características importantes de este equipo es que es compacto y fácil de transportar, cuenta con una configuración de alarmas de las variables meteorológicas medidas, distancia de hasta 300m lineales entre estación y consola y puede ampliarse con repetidores, intervalo de archivo configurable desde 1 minuto hasta 120 minutos, visualización de variables meteorológicas medidas y algunas calculadas en pantalla LCD, bajo consumo de corriente.

Tabla 2. Características de los sensores.

Sensor (variable)	Resolución	Rango	Precisión
Temperatura	0,1 °C	-40 a + 65°C	±0,5°C
Humedad	0,01	1% a 100%	±3%
Lluvia	0,2 mm	0 a 6553 mm	±4%
Dirección del viento	1°	0° a 360°	3°
Velocidad del viento	0,1 m/s	1 a 80 m/s	±5%
Presión barométrica	0,1 mm hg	410 a 820 mm hg	0,8 mm hg

Fuente: INSAK. Estación inalámbrica Vantage Vue 6250. [página web]. [Consultado: 25 de junio del 2021]. Disponible en: https://www.insak.com.co/aym_image/files/03-ESTACI%c3%93N%20METEOROL%c3%93GICA%20DAVIS%20VANTAGE%20VUE%206250.pdf

Tabla 3. Intervalos de actualización de los sensores.

Variable	Unidades	Intervalo de muestreo
Temperatura	°F, °C	10 a 12 segundos
Humedad	%	50 segundos a 1 minuto

¹⁷ Fuente: INSAK. Estación inalámbrica Vantage Vue 6250. [página web]. [Consultado: 25 de junio del 2021]. Disponible en: https://www.insak.com.co/aym_image/files/03-ESTACI%c3%93N%20METEOROL%c3%93GICA%20DAVIS%20VANTAGE%20VUE%206250.pdf

Lluvia	Mm, inch	20 a 24 segundos
Dirección del viento	Grados	2.5 a 3 segundos
Velocidad del viento	Knots, m/s, Km/hr	2.5 a 3 segundos
Presión barométrica	mmHg, Hg, mb, hPa	1 minuto

Fuente: INSAK. Estación inalámbrica Vantage Vue 6250. [página web]. [Consultado: 25 de junio del 2021]. Disponible en: https://www.insak.com.co/aym_image/files/03-ESTACI%c3%93N%20METEOROL%c3%93GICA%20DAVIS%20VANTAGE%20VUE%206250.pdf

6.3.2 Instalación de la estación meteorológica. Para la instalación de la estación meteorológica Davis Vantage Vue 6250 que se utilizó en la finca La Chabela en la toma de datos del recurso eólico, se usó como torre o mástil una caña de guadua de 11 metros de longitud, esto con el fin de reducir al máximo los costos de instalación y utilizar los recursos disponibles en la zona, debido a que este equipo solo permanecerá en este sitio durante un determinado tiempo y no se justifica comprar o alquilar una torre del mercado. La estación meteorológica se acoplo en uno de los extremos de la guadua, la cual se enterró a una longitud de 1 metro, siendo así que la estación quedo instalada a una distancia de 10 metros sobre el suelo. Luego de haber realizado el montaje, se realizaron las respectivas pruebas de funcionamiento para garantizar que el equipo estuviera trabajando correctamente.

Figura 27. Instalación estación meteorológica.



Fuente: Autores del proyecto.

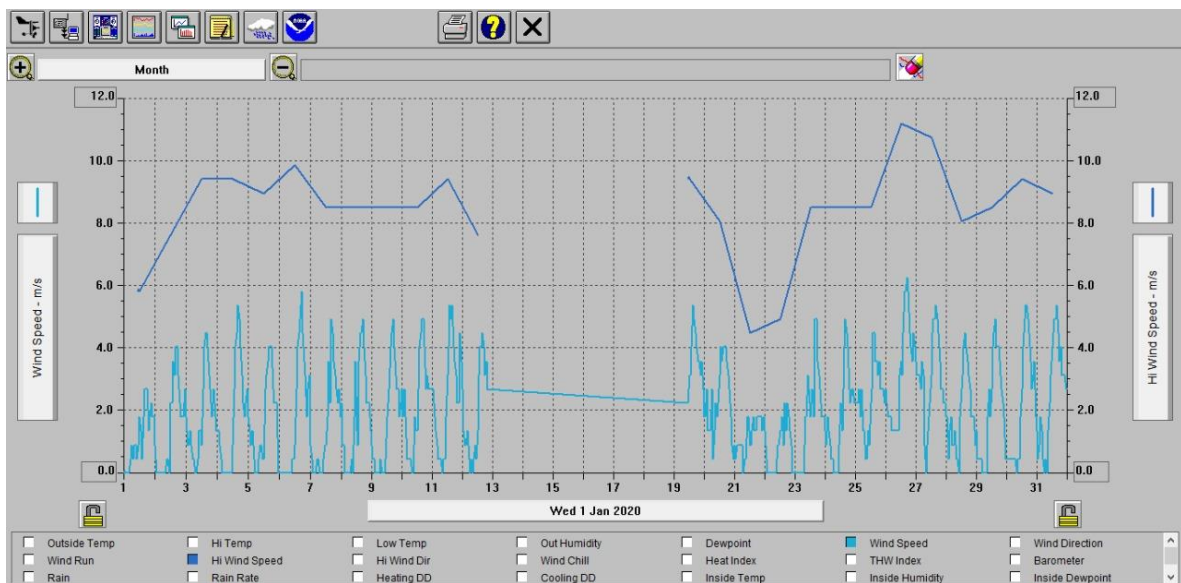
Luego de haberse llevado a cabo el montaje de la estación meteorológica, esta se configuro con ayuda del software WeatherLink de tal manera que se registraran los datos de todas las variables que mide este dispositivo en un intervalo de muestreo horario y de

10 minutos (formato diez-minutal). Se tomaron datos en ambos formatos debido a que la frecuencia establecida por defecto en el equipo es de 1 hora, y posteriormente se realizó el cambio de frecuencia de toma de datos a 10 minutos, ya que esta es la frecuencia más recomendada para que se puedan obtener datos más precisos.

6.3.3 Análisis de los datos Obtenidos. La estación entro en funcionamiento el día 01 de enero del año 2020 y se desinstalo el día 02 de agosto del mismo año. En total fueron 215 días que estuvo instalado el equipo y se obtuvieron: 1278 datos en formato horario correspondientes a los meses de enero y febrero desde la fecha de instalación, y otros 9949 datos en formato de diez minutos correspondientes del 01 de marzo al 02 de agosto, esto para un total de 11227 datos. Todos los datos recolectados por la estación meteorológica en formato .txt se pueden observar en el Anexo A.

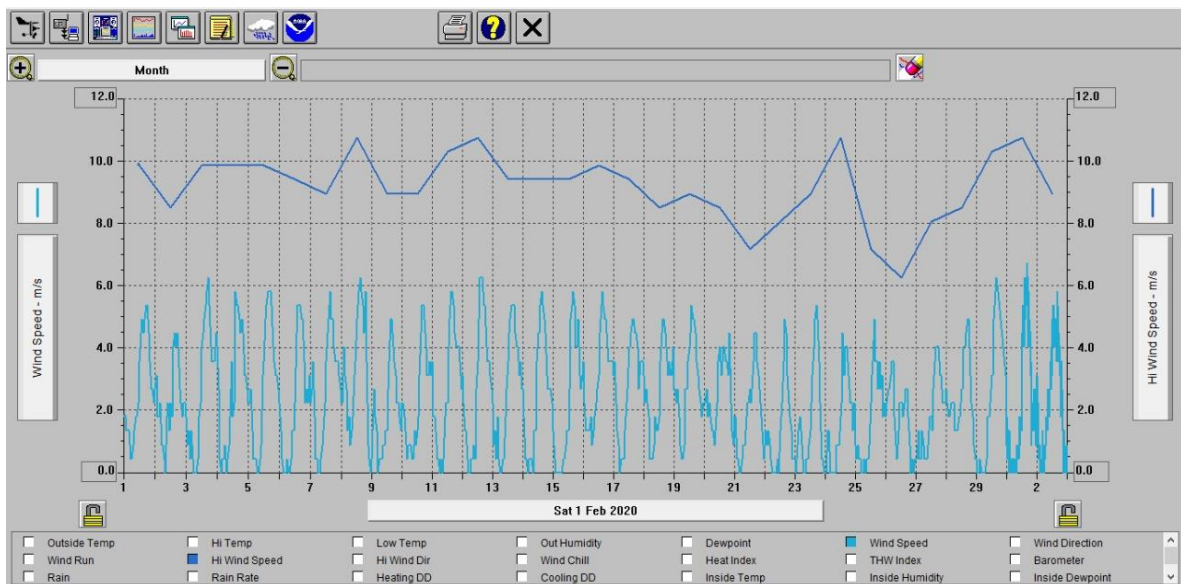
Teniendo en cuenta que en el año 2020 entre el mes de enero y febrero hubo 60 días ya que fue un año bisiesto, se pudo evidenciar (figura 28) que hay un intervalo tiempo entre el día 13 de enero al día 19 de enero en los que hubo interrupción en la recepción de los datos. Eso explica los 162 datos faltantes, ya que el valor teórico de datos que se debieron obtener son 1440.

Figura 28. Datos obtenidos en el mes de enero.



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 29. Datos obtenidos en el mes de febrero.

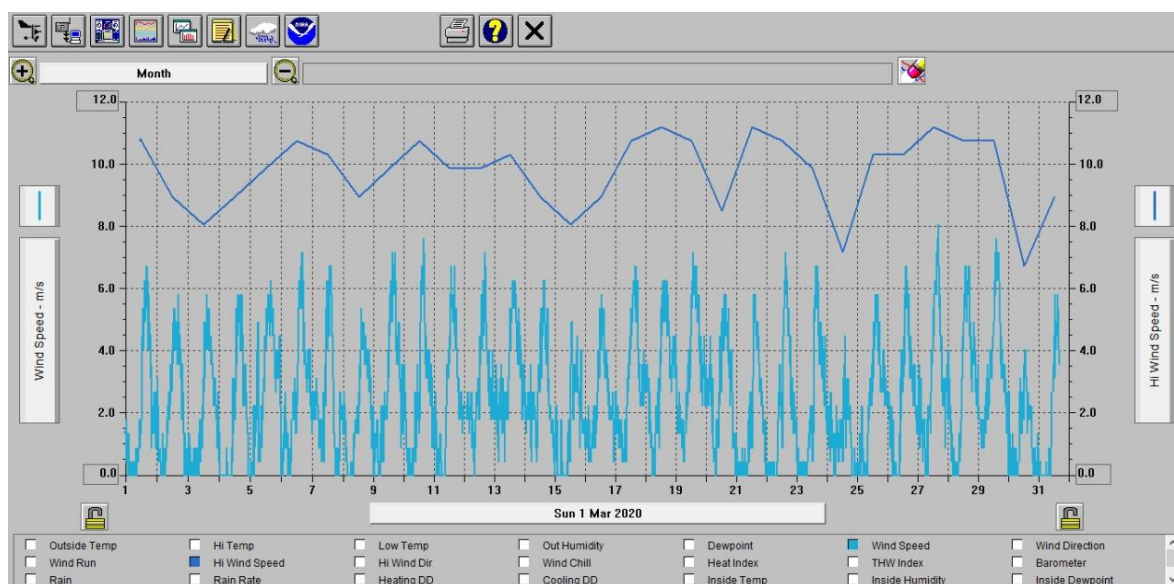


Fuente: Autores del proyecto.

Basándose en la cantidad de días (155 días) que se tomaron datos en una frecuencia de 10 minutos, se evidenció que no se encontraba la cantidad de datos correspondientes a este número de días y que faltaban exactamente 12371 datos. Como se puede observar

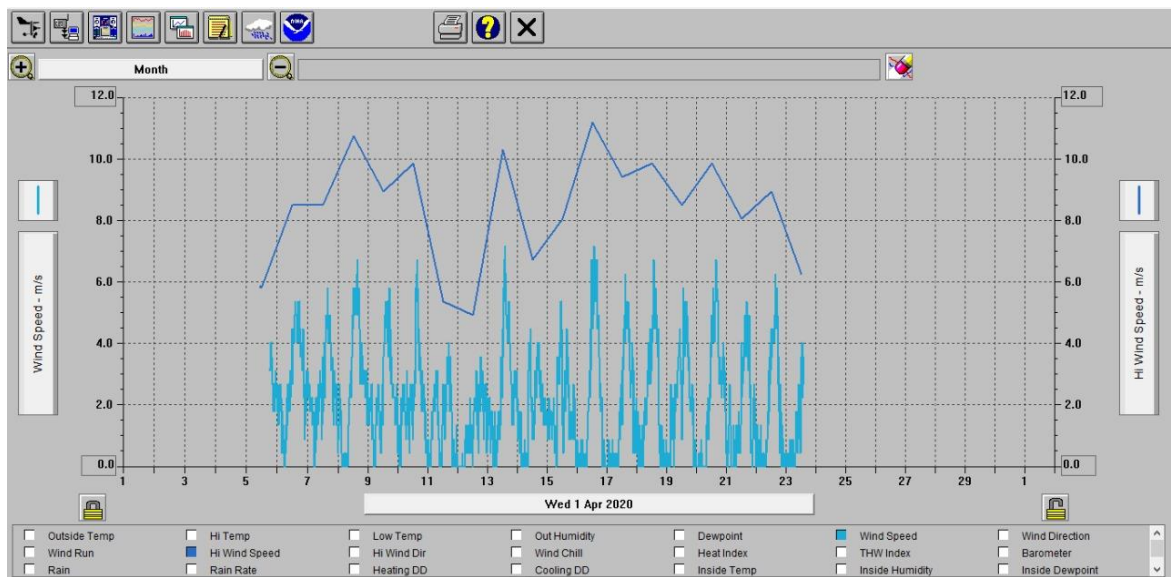
en las figuras 30, 31, 32 ,33 y 34, en marzo se recolectaron todos los datos esperados de manera exitosa; en abril ya se presentan intermitencias al comienzo y al final del mes, obteniendo únicamente 19 días de datos consistentes; en los meses de mayo y junio no se obtuvieron datos relevantes, por lo cual dichos meses serán despreciados y no se tendrán en cuenta al momento de determinar el potencial eólico; y por último, en el mes de julio volvieron a presentarse inconsistencias por lo cual solo se obtuvieron 16 días con datos.

Figura 30. Datos obtenidos en el mes de marzo



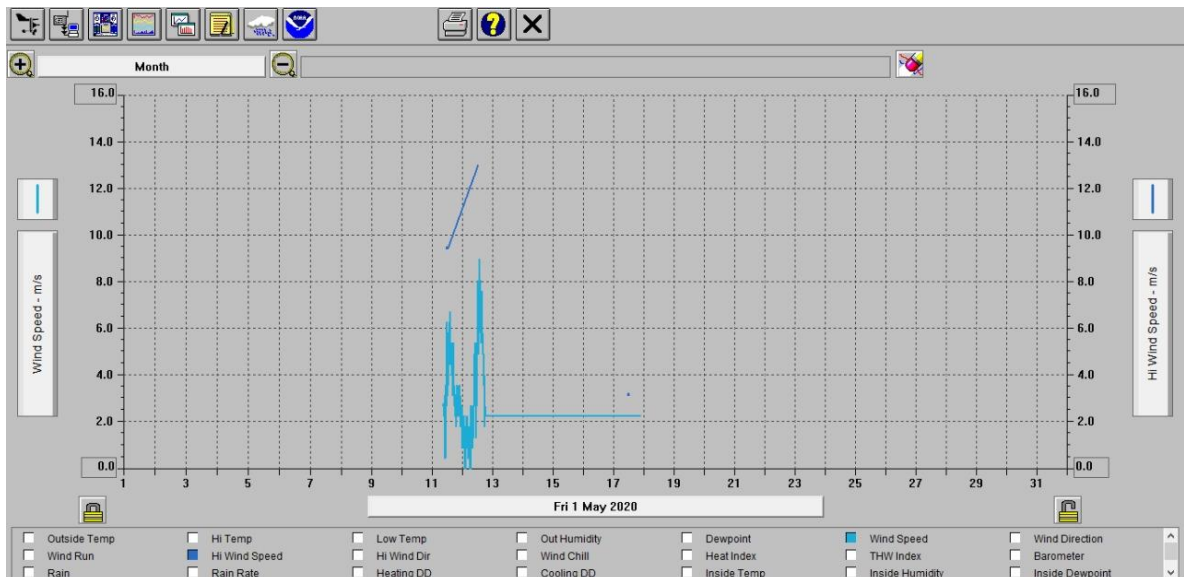
Fuente: Autores del proyecto.

Figura 31. Datos obtenidos en el mes de abril.



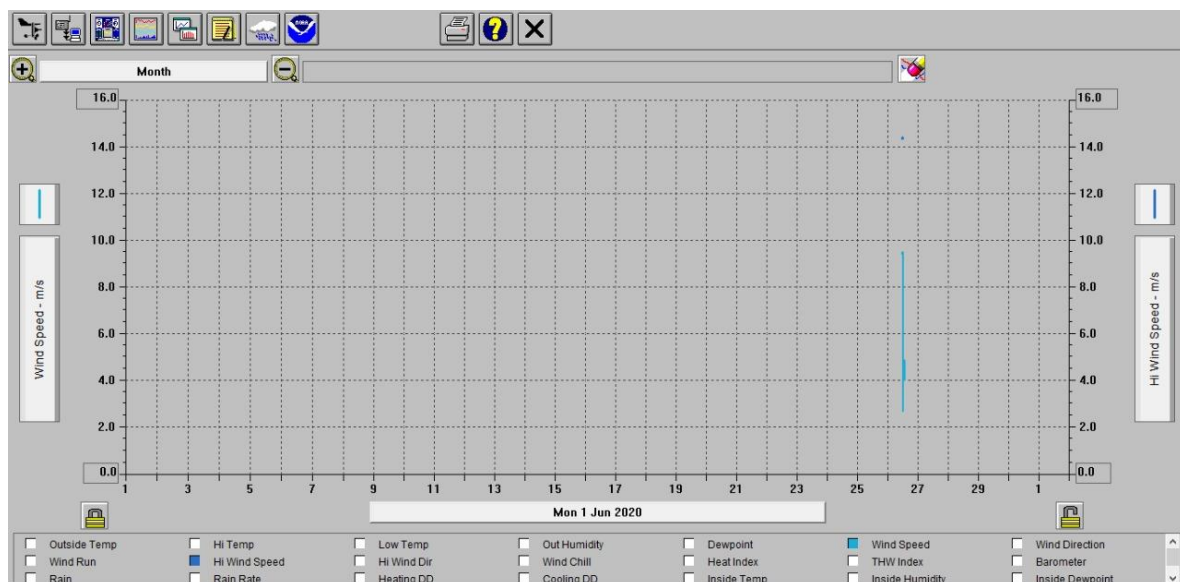
Fuente: Autores del proyecto.

Figura 32. Datos obtenidos en el mes de mayo.



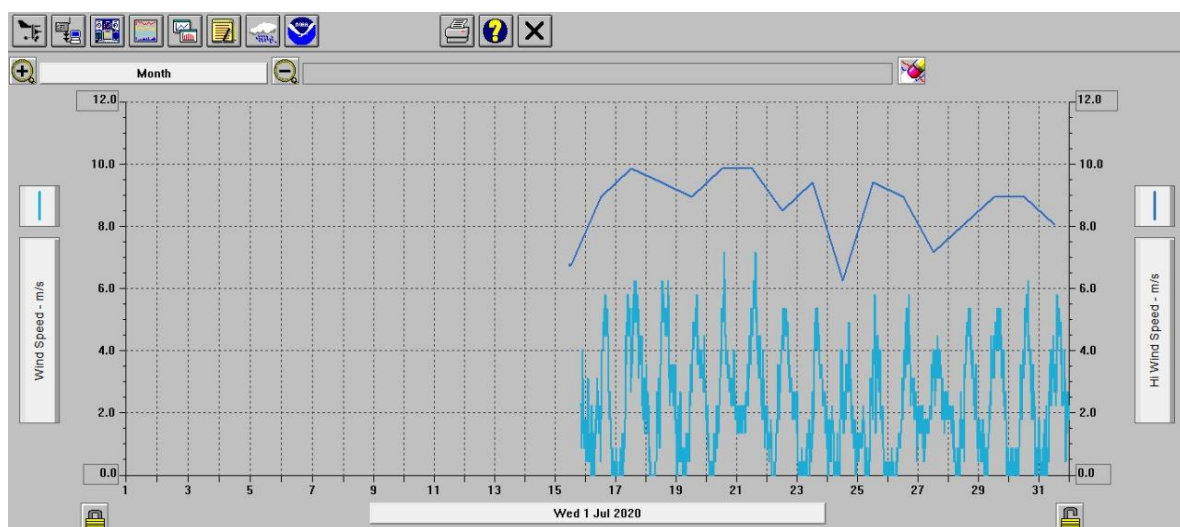
Fuente: Autores del proyecto.

Figura 33. Datos obtenidos en el mes de junio.



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 34. Datos obtenidos en el mes de julio.



Fuente: Autores del proyecto.

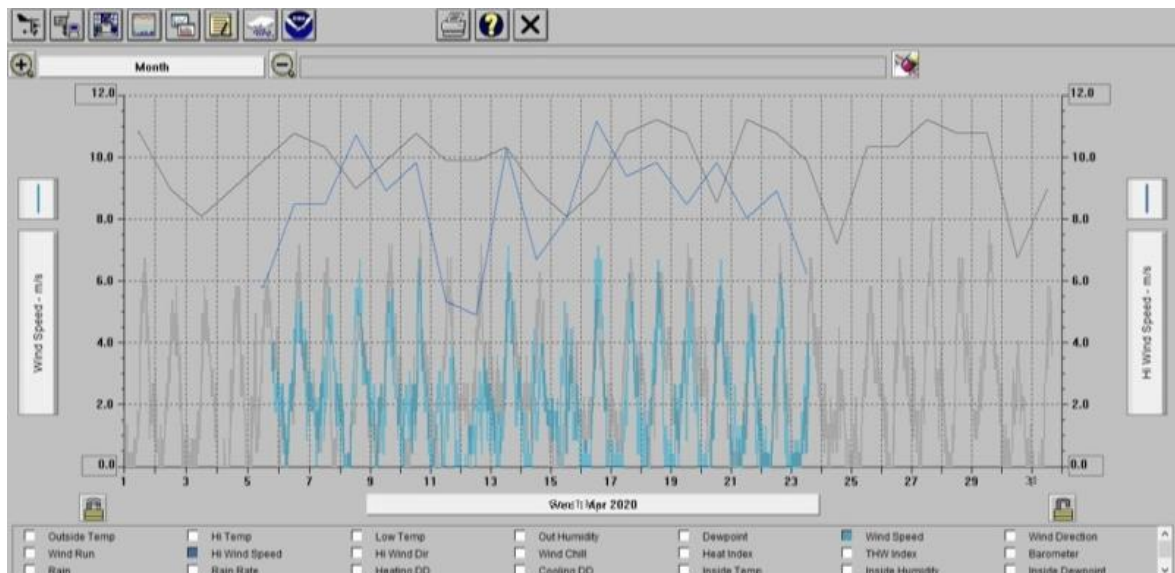
Estos datos faltantes corresponden a diferentes intermitencias en la transferencia de los datos entre el módulo de sensores (ISS), y la consola. Estas inconsistencias se evidenciaron posteriormente al desmontaje de la estación meteorológica, puesto que no

se contaba con acceso presencial o remoto a la consola para realizar el chequeo y la descarga de datos.

Aprovechando que el software WeatherLink también proporciona los datos obtenidos en forma de gráficas, en donde la gráfica azul celeste representa la magnitud de la velocidad del viento en función del tiempo y la gráfica azul oscuro representa la velocidad máxima instantánea registrada durante el intervalo de tiempo establecido para la toma de datos; se pudo hacer un análisis comparativo entre dos meses distintos, con el fin de determinar si existía alguna tendencia en el comportamiento de la velocidad del viento durante el día a lo largo del mes.

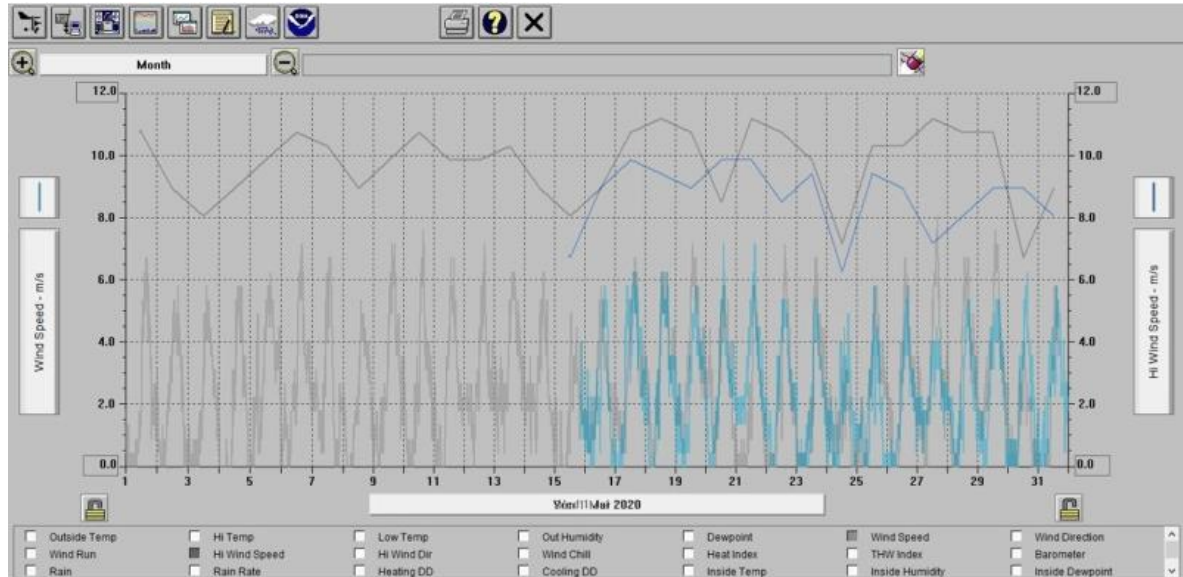
Al realizar la superposición de las gráficas de los datos obtenidos durante los meses de marzo-abril y marzo-julio, se determinó que, si existe un patrón de ocurrencia de las velocidades del viento durante el día, para todos los días de dichos meses. Esto se puede visualizar en las figuras 35 y 36, en donde la gráfica que se encuentra en color gris representa el mes de marzo y las gráficas que se muestran en color azul celeste representan los meses de abril y julio respectivamente.

Figura 35. Superposición de datos marzo-abril.



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 36. Superposición de datos marzo-julio.

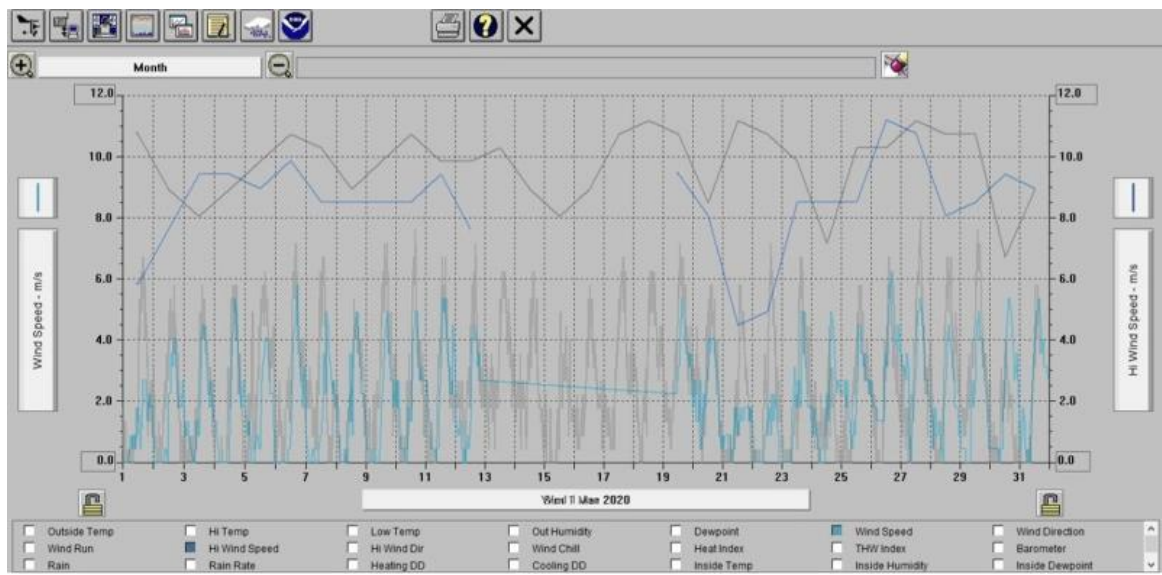


Fuente: Autores del proyecto.

Cabe recalcar que dichas comparaciones se llevaron a cabo con el mes de marzo, debido a que era el único mes que contaba con datos completos y consistentes en formato diez-minutal.

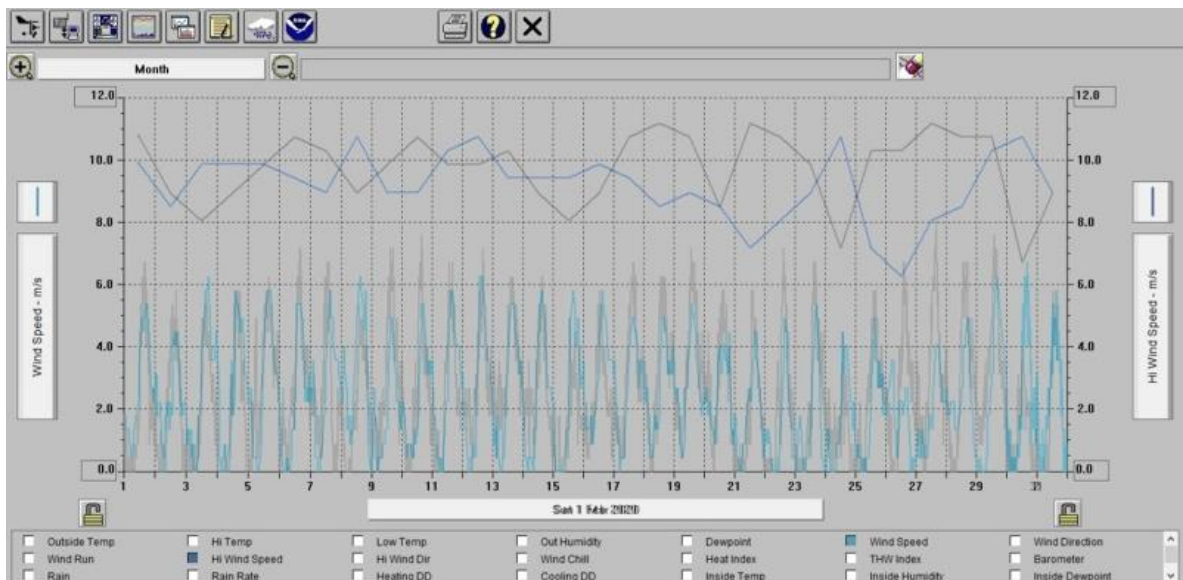
También se llevó a cabo dicha superposición entre los meses de marzo-enero y marzo-febrero para comprobar si la tendencia en el comportamiento diario de la velocidad del viento se mantenía, aunque los datos obtenidos se pertenecieran a distintos intervalos de tiempos en el muestreo. Esto se puede observar en las figuras 37 y 38, en donde se confirma que, sin importar el intervalo de tiempo establecido para la recolección de datos, las velocidades del viento se comportan de manera muy similar. Cabe resaltar, que no se puede hacer una comparación de la misma manera con las velocidades máximas del viento para el periodo de tiempo establecido, ya que estos picos de velocidad son muy variables, repentinas y son datos muy particulares de cada muestra.

Figura 37. Superposición de datos enero-marzo.



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 38. Superposición de datos febrero-marzo.



Fuente: Autores del proyecto.

Por medio de este análisis se llega a la decisión de tener en cuenta todos los datos obtenidos para el cálculo del potencial eólico, despreciando únicamente los meses de mayo y junio ya que durante estos solo se cuenta con menos del 10% de los datos.

En total fueron 27 las variables medidas por el equipo y posteriormente arrojadas por WeatherLink, entre las cuales se encuentran: indicadores del estado de recepción y comunicación, variables psicométricas del aire circundante a la consola (aire interior, se asume que la consola está al interior de una casa), variables de las condiciones meteorológicas circundantes a la ISS, variables psicométricas del aire exterior, variables meteorológicas del viento, variables que miden las precipitaciones en la zona, entre otras variables de carácter meteorológico.

Entre todos estos parámetros encontrados en el archivo descargado, se realizó una selección de aquellos que son necesarios para el cálculo del potencial eólico. Estas variables fueron: Temperatura del aire (°C), humedad relativa (%), velocidad promedio del viento (m/s), dirección del viento (Cardinal) y velocidad instantánea máxima del viento (m/s). Las demás variables medidas se despreciaron ya que no son necesarias para el desarrollo de este proyecto y no se consideran valiosas en este caso.

Figura 39. Visualización de datos obtenidos en el software WeatherLink

Date	Time	Temp Out	Hi Temp	Low Temp	Out Hum	Dew Pt.	Wind Speed	Wind Dir	Wind Run	Hi Speed	Hi Dir	Wind Chill	Heat Index	THW Index	Bar	Rain Rate	Rain D-D	Heat D-D	Cool D-D	In Temp	In Hum	In Dew	In Heat
1/03/20	12:40	25.8	26.2	25.6	77	21.5	4.5	WNW	2.68	7.2	WNW	24.9	27.7	26.7	1008.1	0.00	0.0	0.000	0.052	26.2	73	21.0	27.9
1/03/20	12:50	25.6	25.7	25.5	75	20.8	4.5	WNW	2.68	6.3	WNW	24.6	27.2	26.2	1008.0	0.00	0.0	0.000	0.051	26.4	73	21.2	28.2
1/03/20	13:00	25.5	25.6	25.4	76	21.0	4.0	WNW	2.41	6.3	WNW	24.8	27.1	26.4	1007.8	0.00	0.0	0.000	0.050	26.6	73	21.3	28.6
1/03/20	13:10	25.5	25.7	25.4	75	20.7	5.4	WNW	3.22	8.5	WNW	24.1	27.0	25.6	1007.5	0.00	0.0	0.000	0.050	26.8	72	21.3	28.8
1/03/20	13:20	24.8	25.3	24.2	79	20.9	5.4	WNW	3.22	7.6	WNW	23.3	26.1	24.7	1007.5	0.00	0.0	0.000	0.045	26.9	71	21.2	28.9
1/03/20	13:30	24.2	24.3	24.0	81	20.7	5.4	WNW	3.22	7.6	WNW	22.7	25.4	23.9	1007.5	0.00	0.0	0.000	0.041	26.8	72	21.3	28.8
1/03/20	13:40	23.6	24.0	23.3	83	20.5	4.9	WNW	2.95	8.5	WNW	22.2	24.7	23.3	1007.4	0.00	0.0	0.000	0.036	26.6	72	21.1	28.4
1/03/20	13:50	22.9	23.3	22.6	86	20.5	4.9	WNW	2.95	7.2	WNW	21.6	24.1	22.7	1007.3	0.00	0.0	0.000	0.032	26.3	72	20.8	27.9
1/03/20	14:00	22.6	22.7	22.6	87	20.3	4.0	WNW	2.41	5.8	WNW	21.8	23.7	22.9	1007.3	0.00	0.0	0.000	0.030	26.1	73	20.8	27.7
1/03/20	14:10	22.8	23.1	22.7	87	20.5	4.9	WNW	2.95	6.7	WNW	21.4	23.9	22.5	1007.1	0.00	0.0	0.000	0.031	26.0	74	21.0	27.7
1/03/20	14:20	23.3	23.4	23.1	84	20.4	5.4	WNW	3.22	7.6	WNW	21.7	24.4	22.8	1007.0	0.00	0.0	0.000	0.034	26.2	73	20.9	27.9
1/03/20	14:30	23.2	23.3	23.1	85	20.6	6.3	WNW	3.76	8.9	WNW	21.2	24.4	22.4	1007.0	0.00	0.0	0.000	0.034	26.3	73	21.1	28.2
1/03/20	14:40	23.0	23.2	22.9	86	20.5	5.4	WNW	3.22	8.0	WNW	21.3	24.1	22.4	1006.9	0.00	0.0	0.000	0.032	26.4	73	21.2	28.3
1/03/20	14:50	23.4	23.6	23.2	84	20.6	4.9	WNW	2.95	7.6	WNW	22.1	24.6	23.2	1006.7	0.00	0.0	0.000	0.035	26.6	72	21.1	28.5
1/03/20	15:00	23.0	23.4	22.7	86	20.5	6.3	WNW	3.76	8.9	WNW	20.9	24.1	22.1	1006.4	0.00	0.0	0.000	0.032	26.7	72	21.3	28.7
1/03/20	15:10	22.8	22.9	22.7	86	20.4	6.3	WNW	3.76	8.9	WNW	20.8	23.9	21.9	1006.2	0.00	0.0	0.000	0.031	26.8	72	21.3	28.8
1/03/20	15:20	22.8	23.0	22.7	85	20.2	5.8	WNW	3.49	10.7	WNW	21.0	23.9	22.1	1006.1	0.00	0.0	0.000	0.031	26.9	71	21.2	29.0
1/03/20	15:30	22.9	23.1	22.9	85	20.3	6.3	WNW	3.76	10.7	WNW	20.9	24.1	22.0	1006.4	0.00	0.0	0.000	0.032	27.2	71	21.5	29.4
1/03/20	15:40	22.8	22.9	22.6	86	20.3	5.4	WNW	3.22	7.6	WNW	21.1	23.8	22.2	1006.1	0.00	0.0	0.000	0.031	27.2	70	21.3	29.4
1/03/20	15:50	22.8	22.9	22.7	86	20.3	5.4	WNW	3.22	8.5	WNW	21.1	23.8	22.2	1006.4	0.00	0.0	0.000	0.031	27.1	70	21.2	29.2
1/03/20	16:00	22.7	22.8	22.7	86	20.3	6.3	WNW	3.76	8.5	WNW	20.7	23.8	21.7	1006.2	0.00	0.0	0.000	0.030	27.1	70	21.2	29.2
1/03/20	16:10	22.7	22.8	22.5	85	20.2	6.7	WNW	4.02	8.4	WNW	20.4	23.7	21.5	1006.3	0.00	0.0	0.000	0.030	27.1	70	21.2	29.2
1/03/20	16:20	22.6	22.9	22.7	85	20.1	5.8	W	3.49	8.9	W	20.9	23.8	22.0	1006.2	0.00	0.0	0.000	0.031	27.3	70	21.4	29.6
1/03/20	16:30	22.7	22.8	22.6	85	20.1	6.3	W	3.76	8.9	W	20.7	23.8	21.7	1006.1	0.00	0.0	0.000	0.030	27.6	69	21.4	29.9
1/03/20	16:40	22.6	22.7	22.3	86	20.1	6.3	W	3.76	8.5	W	20.5	23.6	21.6	1006.0	0.00	0.0	0.000	0.029	27.8	68	21.4	30.2
1/03/20	16:50	22.1	22.3	21.9	87	19.8	6.3	W	3.76	8.9	W	20.0	23.2	21.1	1006.1	0.00	0.0	0.000	0.026	27.4	69	21.2	29.7
1/03/20	17:00	21.8	21.8	21.8	88	19.7	5.8	W	3.49	8.5	W	19.8	22.9	20.9	1006.2	0.00	0.0	0.000	0.024	26.9	69	20.7	28.7
1/03/20	17:10	21.7	21.8	21.6	88	19.6	5.8	W	3.49	9.4	W	19.7	22.8	20.8	1006.5	0.00	0.0	0.000	0.023	26.4	70	20.5	27.9
1/03/20	17:20	21.5	21.6	21.4	89	19.6	4.0	WNW	2.41	6.3	W	20.7	22.6	21.8	1006.4	0.00	0.0	0.000	0.022	26.0	71	20.3	27.4
1/03/20	17:30	21.4	21.4	21.3	90	19.7	4.5	WNW	2.68	6.7	WNW	20.2	22.6	21.4	1006.6	0.00	0.0	0.000	0.021	25.7	71	20.0	26.9
1/03/20	17:40	21.3	21.3	21.3	90	19.6	4.0	WNW	2.41	5.8	WNW	20.5	22.4	21.7	1006.8	0.00	0.0	0.000	0.020	25.4	72	20.0	26.6
1/03/20	17:50	21.1	21.2	21.0	91	19.6	5.8	W	3.49	8.0	WSW	19.2	22.3	20.4	1006.8	0.00	0.0	0.000	0.019	25.1	73	19.9	26.3
1/03/20	18:00	20.8	21.0	20.7	92	19.5	5.4	W	3.22	8.0	W	19.1	22.1	20.4	1007.1	0.00	0.0	0.000	0.017	24.9	73	19.7	25.9

Fuente: Autores del proyecto.

Figura 40. Datos obtenidos en formato archivo de texto(.txt)

Fuente: Autores del proyecto.

Abs	A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W																												
	Column		Column		Column		Column		Column		Column		Column		Column		Column		Column		Column		Column		Column		Column		
Date	Time	Temp	Hum	Wind	Temp	Hum	PL	Speed	Dir	Run	Speed	Dir	Chill	Cool	H	Index	Bar	Rain	Rate	Fath	D-D	D-D	D	Temp	Hum	Dew			
[Date]	0:00	17.6	17.7	17.6	99	17.5	0.0	N	0.00	1.3	NE	17.6	1.186	1011.9	0.00	E.0	0.030	0.000	15.5	87	17.3								
[Date]	1:00	17.6	17.4	17.6	17.4	99	17.3	0.0	---	0.00	0.0	---	17.4	1.183	1011.3	0.00	0.0	0.037	0.000	15.4	87	17.2							
[Date]	2:00	17.4	17.5	17.4	99	17.4	0.0	0.0	0.0	0.4	ENE	17.4	1.183	1011.7	0.00	0.0	0.037	0.000	15.3	88	17.2								
[Date]	3:00	17.6	17.6	17.4	100	17.5	0.0	ENE	0.00	0.4	NE	17.5	1.185	1012.7	0.00	0.0	0.035	0.000	15.2	89	17.3								
[Date]	4:00	17.6	17.8	17.4	100	17.6	0.4	ENE	1.61	3.1	ENE	17.6	1.186	1012.9	0.00	0.0	0.032	0.000	15.1	89	17.3								
[Date]	5:00	17.8	17.9	17.5	99	17.6	0.9	ENE	3.22	2.7	ENE	17.8	1.188	1011.1	0.00	0.0	0.023	0.000	15.1	89	17.2								
[Date]	6:00	17.7	18.2	17.2	99	17.4	0.0	ENE	1.61	2.2	ENE	17.7	1.187	1012.2	0.00	0.0	0.025	0.000	15.5	89	17.1								
[Date]	7:00	18.7	19.2	18.2	95	17.9	0.9	ENE	3.22	2.7	NE	18.7	1.187	1012.2	0.00	0.0	0.000	0.016	15.2	89	17.1								
[Date]	8:00	20.6	22.2	19.2	85	17.9	0.9	ENE	3.22	2.7	NE	20.6	1.216	1014.4	0.00	0.0	0.000	0.093	20.4	88	18.3								
[Date]	9:00	22.1	22.8	21.7	84	19.2	0.4	W	1.61	2.3	WSW	22.1	1.210	1014.0	0.00	0.0	0.000	0.155	21.7	86	19.2								
[Date]	10:00	22.9	23.0	23.1	84	20.1	0.0	E	2.22	4.9	ENE	22.9	1.240	1013.1	0.00	0.0	0.000	0.241	23.1	84	19.7								
[Date]	12:00	22.4	23.1	22.1	85	19.7	1.8	ENE	6.44	5.8	ENE	22.4	1.234	1012.5	0.00	0.0	0.000	0.169	23.1	82	19.9								
[Date]	13:00	21.4	23.2	21.1	89	18.6	1.3	WSW	4.83	4.0	WSW	21.4	1.226	1011.6	0.00	0.0	0.000	0.130	23.2	80	19.5								
[Date]	14:00	21.1	21.4	20.6	93	15.5	0.4	NE	1.61	2.7	W	21.1	1.224	1010.3	1.20	0.0	0.000	0.113	21.0	82	18.8								
[Date]	15:00	21.3	21.4	21.3	90	16.1	0.0	W	1.44	4.5	S	21.3	1.224	1009.4	0.00	0.0	0.000	0.220	21.3	W	21.7								
[Date]	16:00	21.0	21.4	20.8	92	15.6	2.7	W	9.66	5.4	SW	21.0	1.223	1009.5	0.00	0.0	0.000	0.111	22.7	82	19.5								
[Date]	17:00	20.8	20.9	20.4	93	15.6	2.7	W	9.66	5.4	W	20.8	1.221	1009.9	0.00	0.0	0.000	0.102	22.5	82									

Fuente: Autores del proyecto.

7. DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

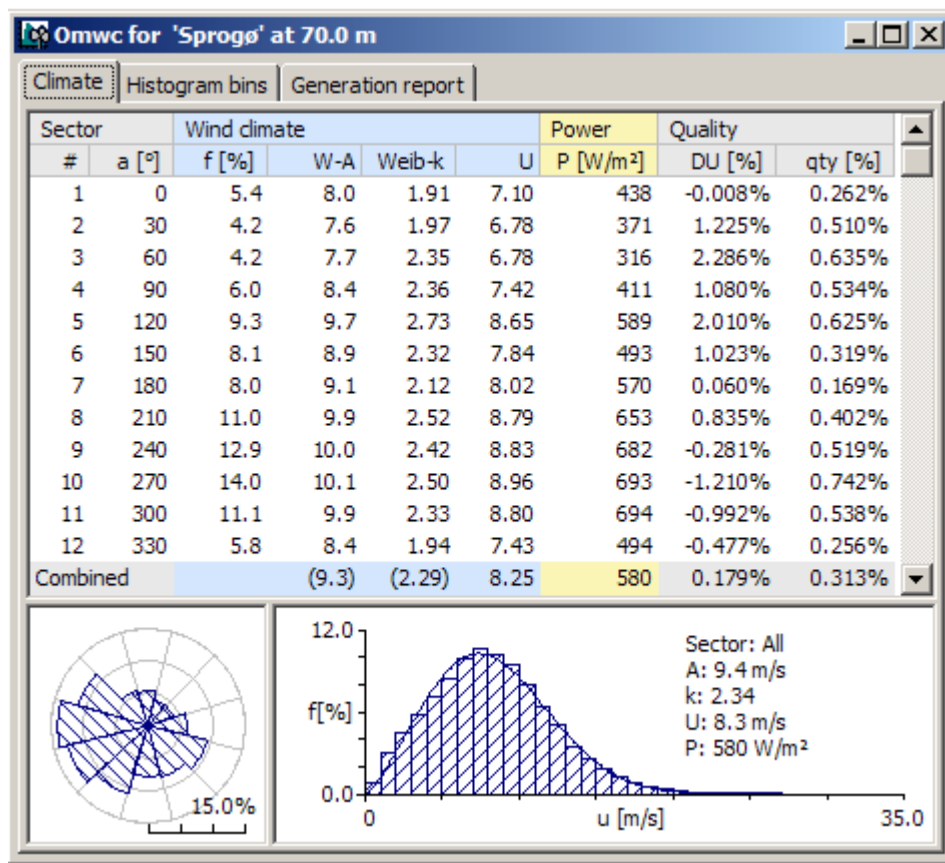
Una vez que se conocen y se tienen los datos del recurso eólico con el cual se cuenta en el sitio de interés, se procede a determinar el potencial eólico del sitio, el cual permite cuantificar la potencia que se puede generar a partir del viento y así poder seleccionar un aerogenerador.

Para determinar esta potencia del viento en el sitio se tomó la decisión de utilizar el software WAsP, el cual es un programa de computación estándar de la industria eólica desarrollado por el Departamento de Energía Eólica de la Universidad Técnica Danesa, que está diseñado para llevar a cabo la evaluación del recurso eólico, ubicación y cálculos de rendimiento para turbinas eólicas y parques eólicos. Este es utilizado en todo tipo de terrenos ubicados en cualquier parte del mundo e incluye modelos y herramientas para cada paso del proceso, desde el análisis de los datos eólicos hasta el cálculo del rendimiento energético de un parque eólico¹⁸.

Este software también incluye algunas herramientas de utilidad gratuitas para el análisis de los datos del viento, entre ellas el aplicativo WAsP Climate Analyst 3.1, el cual se usará en el presente proyecto, ya que permite realizar el análisis de cualquier serie temporal de mediciones de viento para proporcionar un resumen estadístico completo del potencial eólico del viento en el sitio observado. Este resumen estadístico está compuesto por la rosa de los vientos, velocidades promedio del viento en formato horario de cada mes y las distribuciones de velocidad del viento (distribución de Weibull) general y por sectores.

Figura 42. Ejemplo de resultados arrojados por el software WAsP Climate Analyst 3.1.

¹⁸ WIND RESOURCES FOR ENERGY PRODUCTION OF WIND TURBINES. WAsP [página web]. [Consultado: 10 de junio del 2022]. Disponible en: <https://www.wasp.dk/wasp>



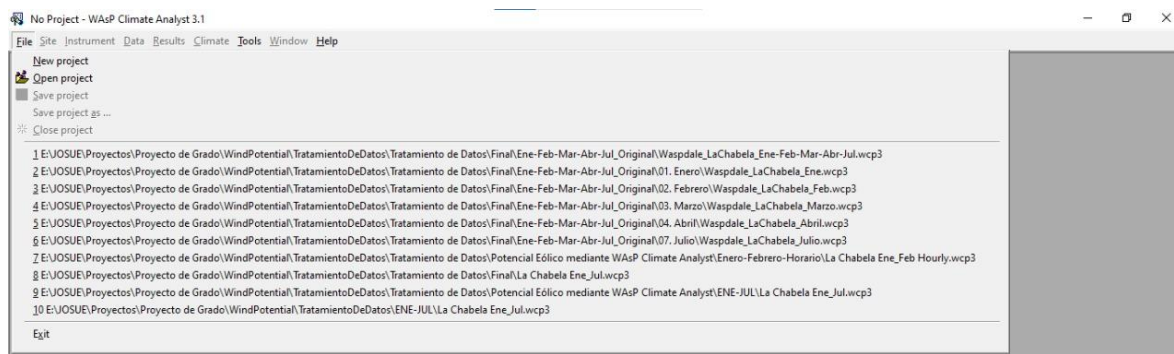
Fuente: WIND RESOURCES FOR ENERGY PRODUCTION OF WIND TURBINES. WASP Climate Analyst [página web]. [Consultado: 10 de junio del 2022]. Disponible en: <https://www.wasp.dk/dataandtools/climate-analyst>

La decisión de usar este software para el cálculo del potencial eólico se debe a que es un programa de acceso libre que cuenta con fundamentación teórica, fue diseñado por una institución de renombre en la industria de la energía eólica que brinda confiabilidad y que permite realizar todos los cálculos de manera sencilla y eficiente. Además, este software cuenta con una interfaz bastante amigable y fácil de comprender, lo cual permite que otras personas sin conocimientos matemáticos o teóricos sobre el cálculo del potencial puedan usarlo y obtener un resultado bastante seguro y confiable.

Para poder usar el software WASP Climate Analyst, lo primero se debe realizar luego de iniciar la aplicación, es ingresar las coordenadas de la ubicación específica del sitio donde se tomaron los datos del viento (ver figura 45), para esto lo que se debe hacer es crear

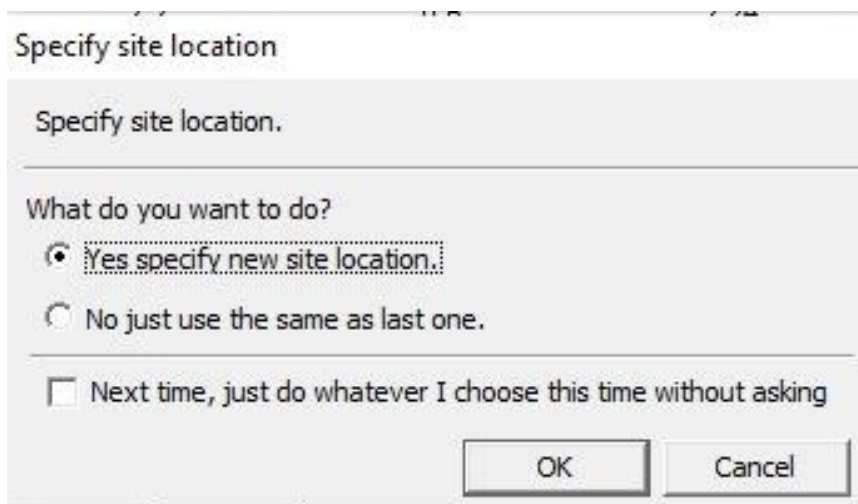
un nuevo proyecto (ver figura 43) y seleccionar la opción de especificar una nueva ubicación (ver figura 44).

Figura 43. Crear nuevo proyecto en WASP Climate Analyst.



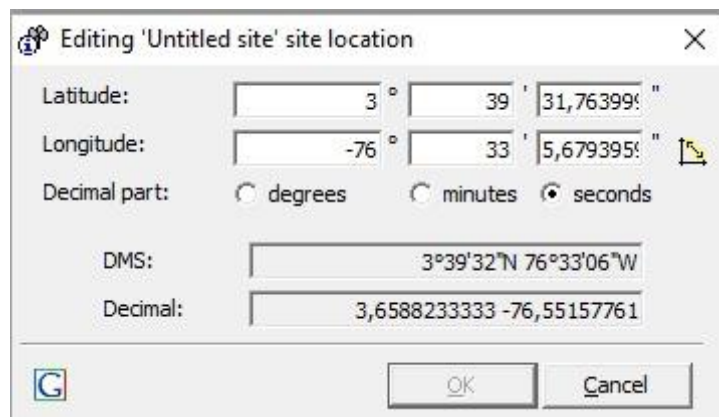
Fuente: Autores del proyecto.

Figura 44. Especificar nueva ubicación en WASP Climate Analyst.



Fuente: Autores del proyecto.

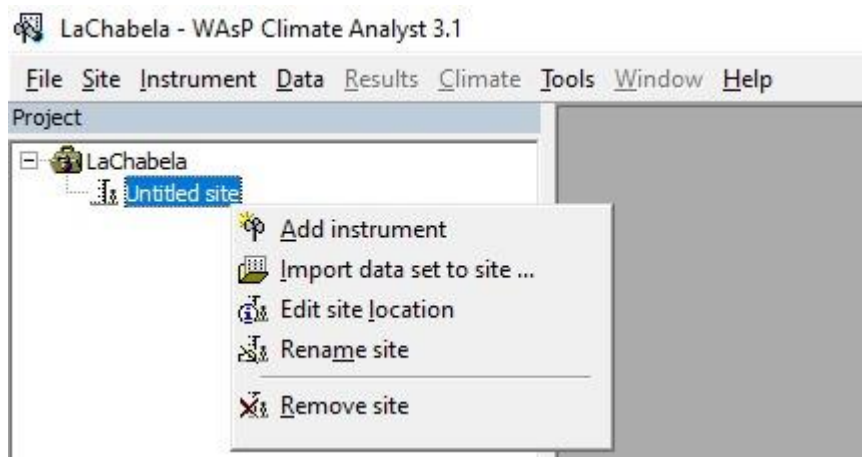
Figura 45. Ingresar coordenadas del sitio en WASP Climate Analyst.



Fuente: Autores del proyecto.

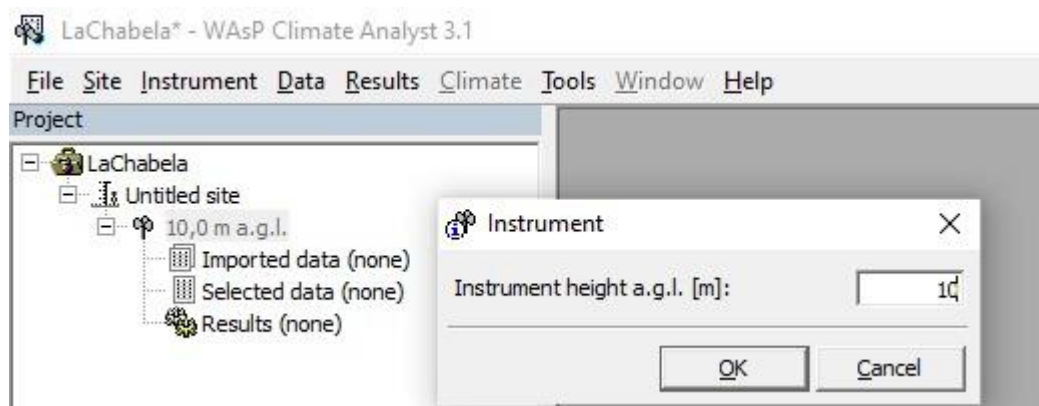
Una vez ingresadas las coordenadas exactas, se debe proceder a agregar un instrumento, en este caso la estación meteorológica y se especifica a que altura se instaló este equipo para la toma de las variables del viento. Seguido de esto ya se pueden importar hacia la aplicación estos datos.

Figura 46. Agregar instrumento en WASP Climate Analyst.



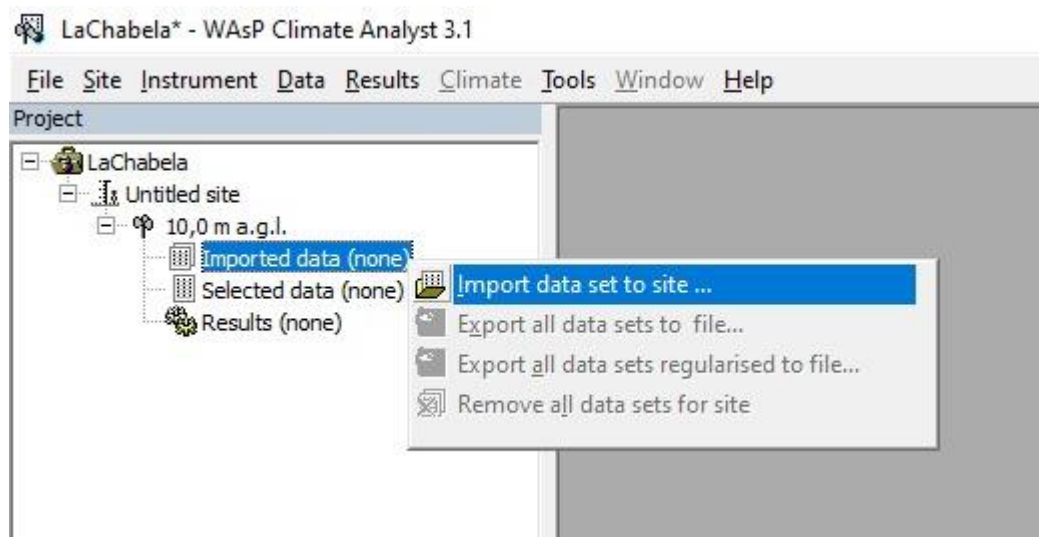
Fuente: Autores del proyecto.

Figura 47. Agregar altura de instalación del instrumento en WASP Climate Analyst.



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 48. Importar datos del viento hacia WAsP Climate Analyst.



Fuente: Autores del proyecto.

Es importante saber que, para poder importar los datos a la aplicación, es necesario que estos se encuentren de manera ordenada según lo establecido por el software (ver figura 49).

Figura 49. Ejemplo archivo .txt de cómo se deben ingresar los datos del viento en WAsP Climate Analyst.

Waspdale airport 2000.txt: Bloc de notas

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda					
YYYY	MM	DD	hh	mm	WS_10_1	WS_25_3	WS_50_5	WD_25_7	
Height					10.1	25.3	50.5	25.7	
Units					m/s	m/s	m/s	deg	
2000	1	1	0	5	4.61E+00	6.16E+00	7.74E+00	1.34E+02	
2000	1	1	0	15	5.05E+00	6.33E+00	7.84E+00	1.34E+02	
2000	1	1	0	25	5.12E+00	6.40E+00	7.98E+00	1.34E+02	

Fuente: Autores del proyecto.

Para obtener el archivo de texto que admite la aplicación, se debe crear un archivo de Excel .csv en donde es necesario organizar y consolidar los datos que se van a ingresar a la aplicación (figura 50) (Anexo C), según el ejemplo mostrado por esta, por último, se debe crear una copia de este como archivo de texto delimitado por tabulación .txt (figura 51) (Anexo D).

Figura 50. Organizar y consolidar datos en Excel en el formato necesario para ingresarlos al WASP Climate Analyst.

Autoguardado Waspdale_LaChabela_Ene-Feb-Mar-Abr-Jul.csv

Archivo Inicio Insertar Disposición de página Fórmulas Datos Revisar Vista Autor

Calibri 11 A⁺ A⁻

N K Fuente Alineación

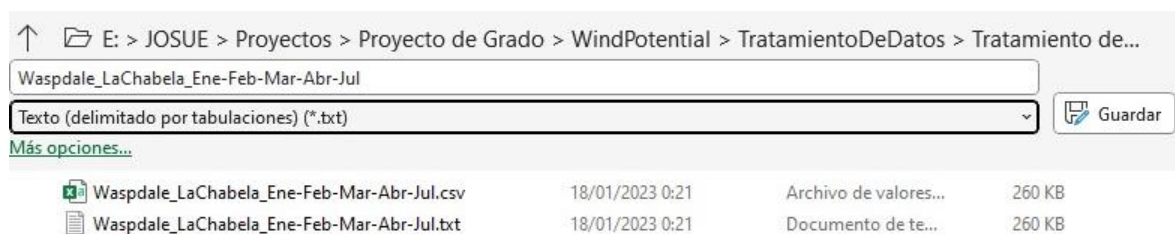
Texto en columnas

J13

	A	B	C	D	E	F	G
1	YYYY	MM	DD	hh	mm	WS_10	WD_10
2	Height					10	10
3	Units					m/s	deg
4	2020	1	1	1	0	0	0
5	2020	1	1	2	0	0	360
6	2020	1	1	3	0	0	45
7	2020	1	1	4	0	0	67,5

Fuente: Autores del proyecto.

Figura 51. Ejemplo de formato .txt para para ingresar los datos al WAsP Climate Analyst.

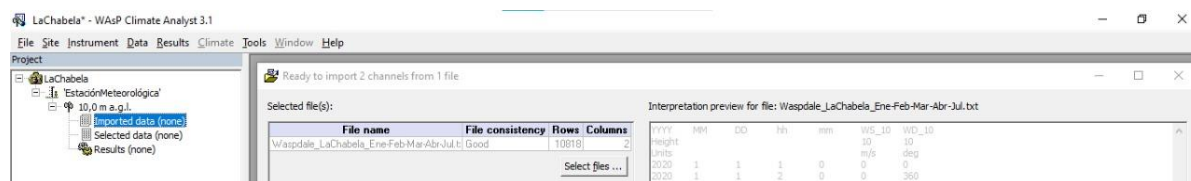


Fuente: Autores del proyecto.

Una vez se tienen los datos compilados en el archivo .txt como los requiere el software, ya se pueden importar los datos a este y obtener todo el análisis estadístico que representa la potencialidad eólica del sitio en cuestión.

Para importar los datos, lo que se debe hacer es ir al apartado superior izquierdo de la pantalla (figura 52) y seleccionar la opción de importar datos, seguido de esto se debe seleccionar y cargar el archivo de texto. En el siguiente paso aparece una ventana donde aparece el resumen de los datos recibidos por el software y si no se detectan anomalías en estos se puede avanzar al siguiente paso en donde se deben ingresar los valores del umbral de calma (figura 53), es decir, la velocidad del viento a la cual comenzaría a girar el aerogenerador. En este caso específico, como aún no se conoce el aerogenerador seleccionado, se estableció un valor de 1.5 m/s, ya que los valores inferiores a este no son considerables ya que la mayoría de aerogeneradores del mercado no lograrían siquiera girar a estas velocidades.

Figura 52. Importación de datos a WAsP Climate Analyst.



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 53. Ingresar valor de umbral de calma a WASP Climate Analyst.

Reading and importing data from 1 file

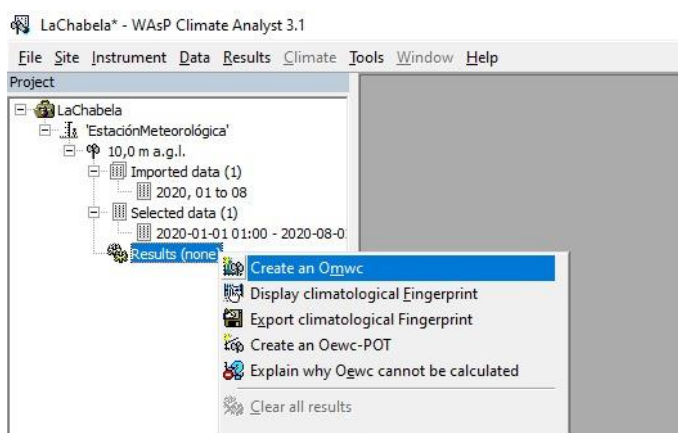
Channel	WS_10	WD_10
Column number	6	7
Recording interval [s]	3600	3600
Discretisation width	0,1	0,1
Averaging time [s]	3600	3600
Multiplier to SI unit	1	1
Offset to SI unit	0	0
Calm threshold [m/s]	0,4	Insert value
Lower limit inclusive [m/s]/[°]	0	0
Upper limit inclusive [m/s]/[°]	90	360

Apply changes

Fuente: Autores del proyecto.

Para finalizar el proceso de importación y recepción de datos, lo siguiente que se debe hacer después de especificar el umbral de calma es verificar que no haya anomalías en los datos aceptados por el software. En el caso del presente proyecto el software leyó y aceptó 10816 datos, el 100% de estos. Para terminar el proceso de determinación del potencial eólico, se deben seleccionar la opción de generar resultados y generar el informe de generación del clima eólico observado (OMWC por sus siglas en inglés) (figura 54).

Figura 54. Generar OMWC en WASP Climate Analyst.

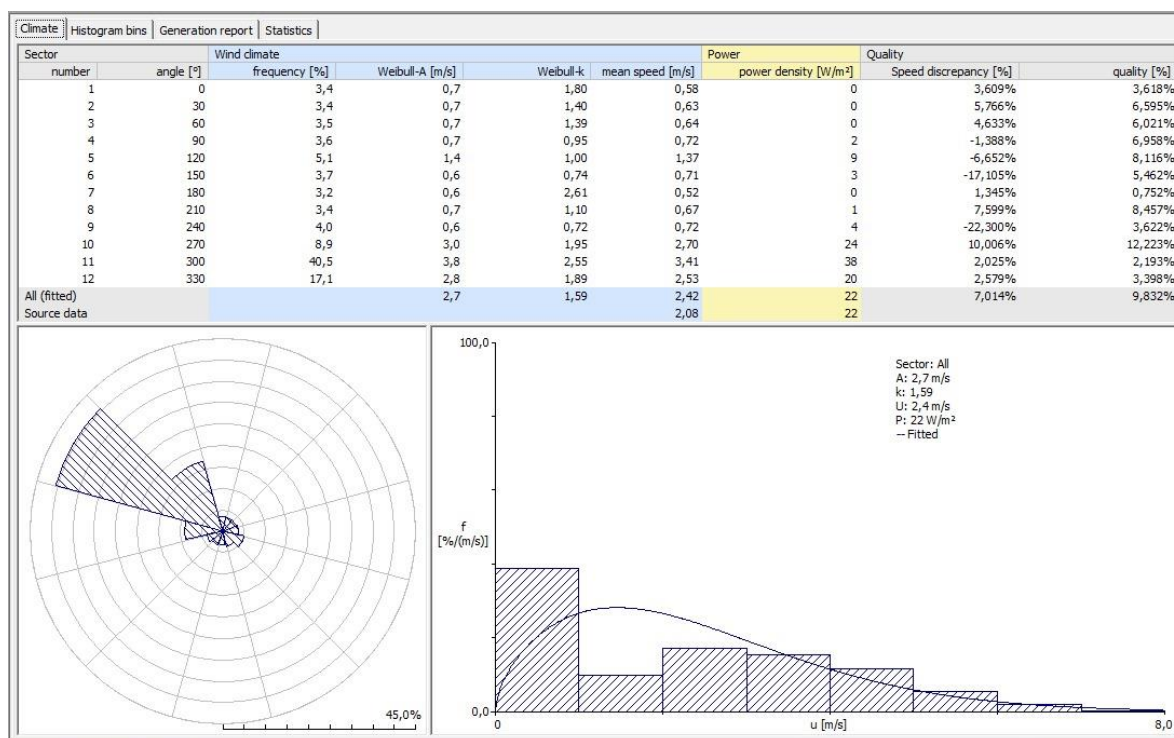


Fuente: Autores del proyecto.

Finalmente, el software WASP Climate Analyst arroja los resultados del análisis estadístico realizado, el cual se compone de la rosa de los vientos, la distribución de Weibull, la densidad de potencia que se puede generar y una tabla de promedios horarios mensuales. Todos estos datos se muestran de manera global y por sectores, y son demasiado útiles al momento de seleccionar un aerogenerador.

En las figuras 53b y 54 se muestran los resultados obtenidos para el presente proyecto, según los datos recopilados por la estación meteorológica instalada en el sitio establecido. Todos los resultados arrojados por el software WASP Climate Analyst se pueden observar en el Anexo E.

Figura 55. Resultados del potencial eólico obtenidos con ayuda del software WASP Climate Analyst, primera parte.



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 56. Resultados del potencial eólico obtenidos con ayuda del software WASP Climate Analyst, segunda parte.

Climate Histogram bins Generation report Statistics													
All-sectors statistics													
Source data (10816)	Weibull-A				Weibull-k				Mean speed		Power density		
Fitted	2,7 m/s				1,99				2,08 m/s		22 W/m²		
Emergent	-				-				2,42 m/s		22 W/m²		
Combined	2,5 m/s				1,44				2,31 m/s		22 W/m²		
Mean wind speeds (hourly, by month)													
Hour	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
0	1.6	2.1	1.6	0.9	---	---	1.3	1.3	---	---	---	---	1.5
1	1.1	1.7	1.4	0.9	---	---	1.0	1.1	---	---	---	---	1.2
2	1.0	1.6	1.2	0.8	---	---	1.0	0.4	---	---	---	---	1.0
3	0.9	1.2	1.0	0.9	---	---	0.9	0.2	---	---	---	---	0.9
4	0.7	1.0	0.9	0.7	---	---	0.7	0.4	---	---	---	---	0.7
5	0.6	0.7	0.8	0.6	---	---	0.7	0.4	---	---	---	---	0.6
6	0.6	0.6	0.6	0.7	---	---	0.5	0.1	---	---	---	---	0.5
7	0.3	0.4	0.8	0.9	---	---	0.7	0.2	---	---	---	---	0.5
8	0.3	0.5	1.0	1.4	---	---	1.3	0.2	---	---	---	---	0.8
9	0.6	1.0	1.6	1.8	---	---	2.0	1.1	---	---	---	---	1.3
10	1.1	1.5	2.3	2.3	---	---	2.4	2.8	---	---	---	---	2.1
11	1.5	2.1	2.9	2.5	---	---	2.9	2.5	---	---	---	---	2.4
12	2.0	2.7	3.5	3.1	---	---	3.2	3.0	---	---	---	---	2.9
13	2.7	3.4	4.7	3.6	---	---	3.9	3.9	---	---	---	---	3.7
14	3.6	4.3	5.2	4.3	---	---	4.5	4.8	---	---	---	---	4.5
15	4.0	4.8	5.2	4.7	---	---	4.8	5.4	---	---	---	---	4.8
16	4.4	5.0	5.1	4.4	---	---	4.6	4.4	---	---	---	---	4.6
17	4.2	4.8	4.4	4.0	---	---	4.3	4.0	---	---	---	---	4.3
18	3.7	4.2	3.7	3.0	---	---	3.5	3.3	---	---	---	---	3.6
19	3.0	3.5	3.0	2.4	---	---	2.9	3.1	---	---	---	---	3.0
20	2.5	3.0	2.7	2.1	---	---	2.5	3.1	---	---	---	---	2.7
21	2.3	2.5	2.4	1.7	---	---	2.1	2.3	---	---	---	---	2.2
22	2.4	2.3	2.1	1.5	---	---	1.8	1.2	---	---	---	---	1.9
23	1.9	2.2	1.8	1.3	---	---	1.4	0.3	---	---	---	---	1.5
Average	2.0	2.4	2.5	2.1	---	---	2.3	2.1	---	---	---	---	2.2
Mean wind speeds (yearly, by month)													
Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
2020	2.0	2.4	2.5	2.1	---	---	2.3	1.9	---	---	---	---	2.2
Average	2.0	2.4	2.5	2.1	---	---	2.3	1.9	---	---	---	---	2.2

Fuente: Autores del proyecto.

En los resultados arrojados por el software se pueden observar diferentes factores que serán decisivos al momento de determinar si es viable la implementación de un aerogenerador y, si es así, cuál sería el más adecuado según estos aspectos. La figura 55 se muestran los resultados de los 12 sectores en los que el software analizó los datos, en estos se puede observar que el sector 11, que corresponde al Angulo de 300°, es donde se presenta la mayor velocidad del viento, la cual es de un promedio 3,41 m/s, con una frecuencia de aparición del 40,5%, y es de la dirección donde se obtendría más densidad de potencia con un valor de 38 W/m².

Aunque estos datos corresponden a una velocidad y a una densidad de potencia considerables, no son suficientes, debido a que el resultado final depende directamente del promedio de todos los resultados de cada sector.

Estos resultados también muestran que, en 9 de los 12 sectores, la velocidad promedio no alcanzó a superar los 1,5 m/s, lo que nos indica que el viento proveniente de estas

direcciones no es suficiente para poder mover un aerogenerador con un umbral de calma de 1,5 m/s, lo cual ya es demasiado bajo teniendo en cuenta el funcionamiento de la mayoría de aerogeneradores existentes.

Siendo así, los resultados generales del potencial eólico, dan como resultado una velocidad promedio de 2,42m/s y una densidad de potencia de 22W/m². Teniendo en cuenta que según la ley de Betz, solo el 59% de la energía contenida en el viento podría ser transformada en energía eléctrica, eso sin tener en cuenta las pérdidas ocasionadas por los componentes mecánicos del aerogenerador, la densidad de potencia real aprovechable del sitio sería aproximadamente de 13W/m². Conociendo el potencial eólico del sitio específico en el que se está llevando a cabo este proyecto, se puede decir con certeza que no es viable implementar un sistema eólico de baja potencia en este lugar, ya que en la industria de la energía eólica se considera que para que pueda ser rentable generar energía eléctrica a partir de aerogeneradores se debe contar por lo menos con una densidad de potencia de 200W/m²¹⁹.

Aunque en este caso específico no es viable la implementación de un sistema eólico para la generación de energía, se tomó la decisión de continuar con la selección y montaje de un aerogenerador, ya que este proyecto está enfocado a implementar una metodología que permita seleccionar un sistema eólico de baja potencia para posteriormente instalarlo. Para poder continuar con el proceso de selección, se llevara a cabo un análisis técnico-económico con ayuda de los promedios de velocidad del viento horarios por mes (figura 56), en donde se determinara entre unos aerogeneradores que serán previamente seleccionados teniendo en cuenta diferentes factores, cual es el aerogenerador con el cual se obtendrá el retorno a la inversión en el menor tiempo posible, basándose en la potencia que estos podrán generar según estos datos de velocidad promedio.

¹⁹ ENERGÍA EÓLICA. Energía Renovable y Desarrollo Sostenible. DiselEnergy [página web]. [Consultado: 30 de agosto del 2022]. Disponible en: <https://diselenergy.com/energia-eolica-2/#:~:text=La%20potencia%20que%20suministra%20el,eléctrica%20a%20partir%20de%20aerogeneradores>

8. ANALISIS TECNICO-ENONOMICO Y SELECCIÓN DEL AEROGENERADOR

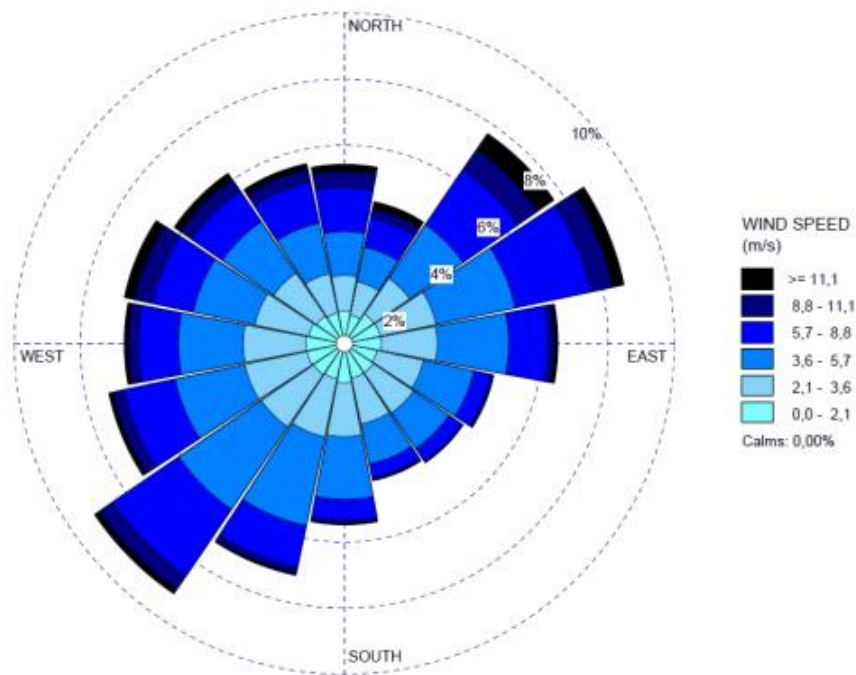
8.1 SELECCIÓN DEL TIPO DE AEROGENERADOR

Antes de poder realizar la selección del aerogenerador, se debe elegir el tipo de aerogenerador más adecuado teniendo en cuenta los factores de variabilidad del viento, velocidad de arranque y velocidad nominal.

8.1.1 Variabilidad del viento. Como ya se sabe la velocidad del viento no es una constante, por el contrario, es una variable que se encuentra siempre fluctuando a través del tiempo tanto en magnitud como en dirección, los cuales son datos muy importantes al momento de determinar el tipo o clase de aerogenerador que se va a implementar.

Específicamente, la manera en la que afecta la magnitud de la velocidad del viento está directamente ligada al potencial eólico, ya que, a valores mayores de velocidad del viento, habrá mayor densidad de potencia, lo cual lo hace el factor más importante para elegir qué clase de aerogenerador sería el más adecuado; y la manera en la que afecta la dirección del viento está relacionada a la eficiencia de generación del equipo, debido a que es posible que las velocidades del viento más considerables provengan de una única dirección, como es el caso de este proyecto (figura 55), o que existan varias velocidades del viento con una gran magnitud y que provengan de diferentes direcciones (figura 57), lo cual causaría que algunos equipos presentaran algún tipo ineficiencias debido al cambio constante de dirección del eje y la resistencia al viento.

Figura 57. Ejemplo rosa de los vientos de la costa de Barcelona.



Fuente: GOMÁRIZ GAYÁ, Carlos. Estudio de sostenibilidad energética para una piscina de altas prestaciones. Barcelona, 15 de junio de 2015. Grado en: Ingeniería Civil. Escola De Camins. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental. 2015. P. 13.

Como se mostró en la figura 55, el sitio en el que se llevó a cabo este proyecto presenta vientos provenientes en un 40,5% del Noroeste(NW), un 17,1% del Nor-Noroeste (NNW), 8,9 % del este(W) teniendo así un 66,5 % del tiempo la dirección del viento proveniente entre los 270° y los 330°, además, la densidad de potencia del viento que provienen desde estas direcciones son las mayores para el sitio.

Esto quiere decir que en este caso específico se concentran las mayores magnitudes en un mismo rango de direcciones del viento, por lo cual puede ser posible seleccionar un aerogenerador de eje horizontal en el cual el plano de generación será siempre perpendicular a la dirección del viento, con el que se aprovecharían las magnitudes de velocidad del viento más altas; y también un aerogenerador de eje vertical, ya que igualmente se seguirían aprovechando dichas magnitudes altas de esa dirección

predominante y de cualquier otra que pudiera aparecer. En resumen, si la decisión dependiera únicamente de este factor, ambas clases de aerogenerador serian viables.

8.1.2 Velocidad de arranque y velocidad nominal. Como se describió anteriormente en el marco teórico, más específicamente en el capítulo 4.4.5, la velocidad de arranque de un aerogenerador, es la velocidad del viento a partir de la cual el equipo comenzara a producir energía eléctrica; y la velocidad nominal es la velocidad del viento a la que el aerogenerador alcanzará su potencia nominal.

En los datos mostrados en figura 56, en la columna “year” se presenta un día tipo para promedios de velocidad del viento horarios. A continuación, se muestra el resumen de dichos datos en la Tabla 4.

Tabla 4. Velocidad promedio horaria para un día tipo del sitio en estudio.

Hora	Velocidad promedio (m/s)
0	1.5
1	1.2
2	1.0
3	0.9
4	0.7
5	0.6
6	0.5
7	0.5
8	0.8
9	1.3
10	2.1
11	2.4
12	2.9
13	3.7

14	4.5
15	4.8
16	4.6
17	4.3
18	3.6
19	3.0
20	2.7
21	2.2
22	1.9
23	1.5
Promedio Diario	2.2

Fuente: Autores del proyecto.

Como se observa en la tabla 4, las velocidades promedio horarias para lo que sería un día tipo en el sitio no son muy altas, presentando un promedio diario de 2.2 m/s y una velocidad promedio horaria máxima de 4.8 m/s a las 13:00 horas del día, por lo cual, es más viable seleccionar un tipo de aerogenerador que tenga una velocidad de arranque inferior a los 2.2 m/s y una velocidad nominal cercana a los 4.8 m/s, para que así se pueda aprovechar al máximo las velocidades que se tienen.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el sitio y los factores de velocidad de arranque y velocidad nominal, el tipo de aerogeneradores que mejor se adaptaría a estas condiciones son los de eje vertical, ya que, como se describió en el marco teórico, específicamente en el capítulo 4.4.3.2, son los más usados en el sector de la generación de baja potencia, debido a que funcionan a velocidades de viento más bajas.

Debido a que hoy en día existen aerogeneradores de eje horizontal que funcionan de manera eficiente a bajas velocidades y que tienen un coeficiente de potencia (figura 12) mayor, lo cual les permite aprovechar una mayor cantidad de energía que los de eje vertical, no se van a excluir durante el proceso de preselección, por lo que la variable que

finalmente determinará cual será el aerogenerador más adecuado será el aspecto económico. A demás, esto permitirá que el proceso sea más completo y útil para el desarrollo de la metodología, en caso de que se contaran con resultados diferentes.

8.2 PRESELECCIÓN DE AEROGENERADORES

Para poder llevar a cabo este proceso de preselección, se hizo inicialmente un análisis al mercado de la energía eólica en Colombia, donde se evidenció que en este país no existen hasta el momento tiendas físicas que se encarguen de comercializar aerogeneradores y tampoco se encontró ninguna empresa nacional que fabrique estos equipos, lo que significa que la mayoría de turbinas eólicas disponibles en el país son importadas desde otros países, lo cual hace que su costo aumente considerablemente. Otro de los aspectos importantes que se reconoció, es que, al momento de realizar la búsqueda en línea de aerogeneradores disponibles para la venta, la mayor parte de estos son equipos chinos de marcas y empresas no reconocidas, que no cuentan con manual del equipo y que aparentemente no tienen ningún estudio, ni datos asociados, simplemente venden las maquinas con una potencia nominal sin más especificaciones, lo cual hace bastante difícil calcular cuanta potencia se podría generar con estos equipos, su retorno a la inversión y saber cuál es la vida útil de estos.

Dado que lo que se quiere hacer es un análisis técnico económico basado en el retorno a la inversión, teniendo como base la potencia que se podría generar con las velocidades promedio del viento del día tipo, es necesario que los aerogeneradores que van a participar en el análisis cuenten con los datos del fabricante como curva de potencia, potencia nominal, velocidad nominal, velocidad de arranque, etc. Todo esto con el fin de que se puedan obtener resultados confiables y se logre tomar la mejor decisión con respecto a la adquisición del equipo.

Teniendo en cuenta la descripción y los factores anteriormente mencionados, y considerando las velocidades promedio horarias del día tipo, se llevó a cabo una

búsqueda en el mercado online de aerogeneradores no mayores a 1Kw de generación, que tuvieran unas velocidades de arranque y nominal relativamente bajas, que contaran con un manual con todas las especificaciones del equipo y que se tuviera alguna información sobre el fabricante de este. Finalmente se eligieron los siguientes aerogeneradores que van a participar en el análisis técnico-económico:

- Aerogenerador TESUP Master X 1kW.
- Aerogenerador Pikasola 400W.
- Aerogenerador Vertical Aeolos V-300W.

8.2.1 Aerogenerador TESUP Master X 1kW. Master X es un aerogenerador de eje horizontal de tres palas, diseñado y fabricado por la compañía europea TESUP, cuenta con una potencia nominal de 940W por hora y tiene un valor comercial en Colombia de \$5'228.490 pesos colombianos.

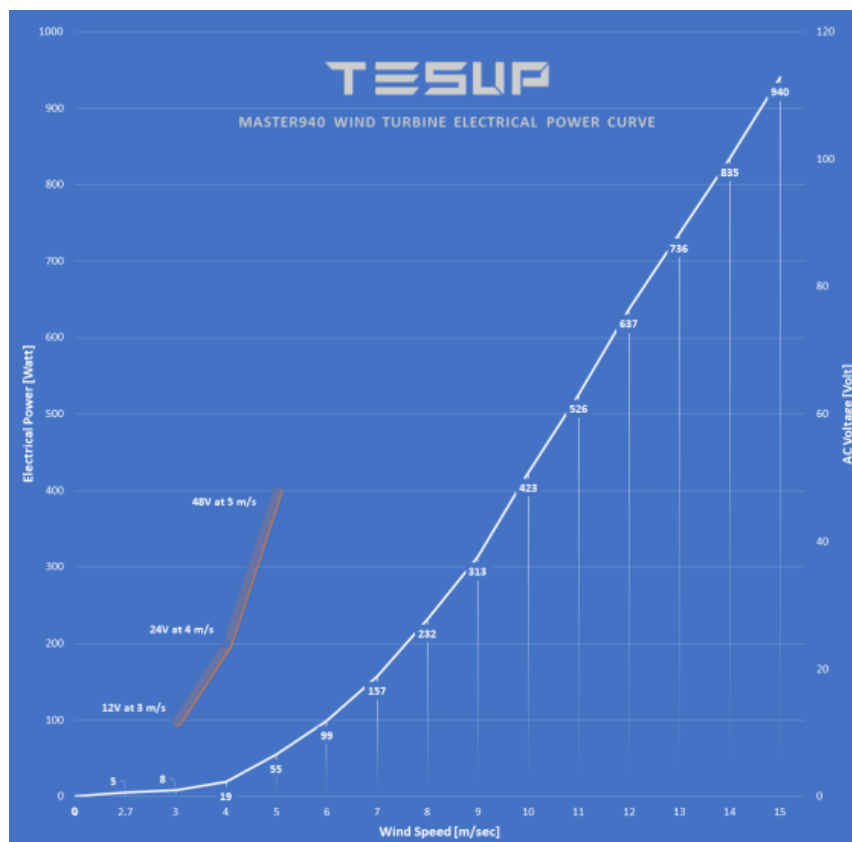
Figura 58. Aerogenerador TESUP Master X 1kW.



Fuente: AEROGENERADOR MASTER X. TESUP CO [página web]. [Consultado: 1 de septiembre del 2022]. Disponible en: https://www.tesup.com.co/product-page/aerogenerador-maestrax-para-casa-Colombia?gclid=CjwKCAiAoL6eBhA3EiwAXDom5r-lxQDVEqgR7wjFxlRBDthw2VYcVtwlgSJQaZ4ZoybKhHFSTmjOphoCO80QAvD_BwE

Algunas de las características de este aerogenerador son: tiene un peso de 9kg, las palas son de aluminio y el cuerpo de fibra de carbono, viene con su respectivo controlador, tiene una vida útil de 20 años, las palas tienen un diámetro de 1,6 m, tiene una velocidad de arranque de 3 m/s y una velocidad nominal de 15 m/s. A continuación, en la figura 59 se muestra la curva de potencia para este aerogenerador, la cual será necesaria para poder llevar a cabo el análisis técnico-económico.

Figura 59. Curva de potencia Aerogenerador TESUP Master X 1kW.



Fuente: AEROGENERADOR MASTER X. TESUP CO [página web]. [Consultado: 1 de septiembre del 2022]. Disponible en: https://www.tesup.com.co/product-page/aerogenerador-maestrax-para-casa-Colombia?gclid=CjwKCAiAoL6eBhA3EiwAXDom5r-lxQDVEqgR7wjFxlRBDthw2VYcVtwlgSJQaZ4ZoybKhHFSTmjOphoCO80QAvD_BwE

8.2.2 Aerogenerador Pikasola 400W. Este es un aerogenerador de eje horizontal de tres palas, diseñado y fabricado por la marca Pikasola, aunque es distribuido y vendido en Colombia por Amazon. Cuenta con una potencia nominal de 400W por hora y tiene un valor comercial en Colombia de \$1'786.578 pesos colombianos.

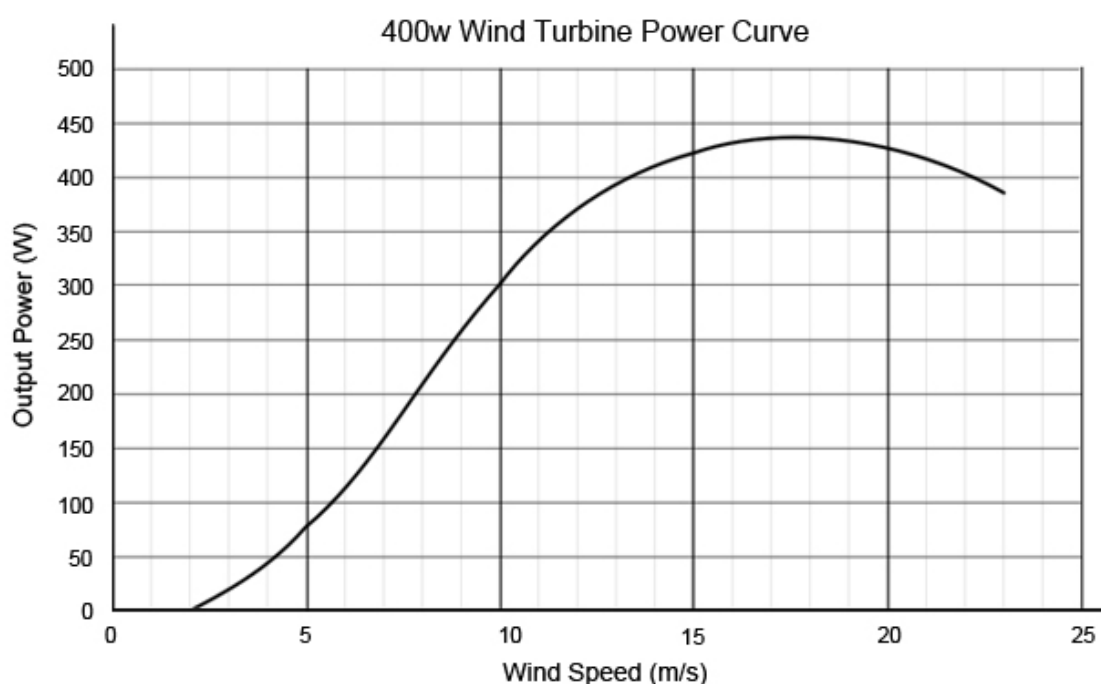
Figura 60. Aerogenerador Pikasola 400W.



Fuente: AEROGENERADOR PIKASOLA 400W. Amazon.com [página web]. [Consultado: 1 de septiembre del 2022]. Disponible en: <https://www.amazon.com/Pikasola-Generator-Starting-Turbines-Controller/dp/B0897PHY5X>

Algunas de las características de este aerogenerador son: tiene un peso de 8,43 kg, las palas son de 1.3 m de diámetro, hechas de fibra de carbono de nailon impermeable, viene con su respectivo controlador y, tiene una vida útil de 20 años, tiene una velocidad de arranque de 2.5 m/s y una velocidad nominal de 13 m/s. A continuación, en la figura 61 se muestra la curva de potencia para este aerogenerador, la cual será necesaria para poder llevar a cabo el análisis técnico-económico.

Figura 61. Curva de potencia Aerogenerador Pikasola 400W.



Fuente: AEROGENERADOR PIKASOLA 400W. Amazon.com [página web]. [Consultado: 1 de septiembre del 2022]. Disponible en: <https://www.amazon.com/Pikasola-Generator-Starting-Turbines-Controller/dp/B0897PHY5X>

8.2.3 Aerogenerador Vertical Aeolos V-300W. Aeolos V-300W es un aerogenerador de eje vertical de tres palas, diseñado y fabricado por la compañía inglesa AEOLIS, cuenta con una potencia nominal de 300W por hora y tiene un valor comercial en Colombia de \$7'677.000 pesos colombianos.

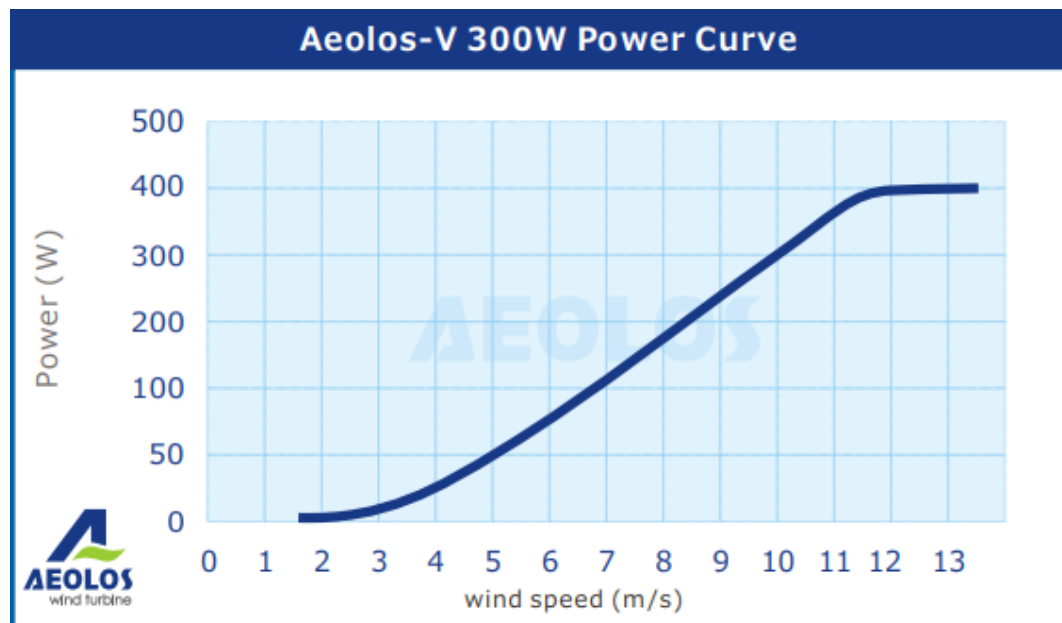
Figura 62. Aerogenerador Vertical Aeolos V-300W.



Fuente: RESIDENTIAL VERTICAL AXIS WIND TURBINE - AEOLOS 300W Vertical Aeolos Wind Turbine Company [página web]. [Consultado: 1 de septiembre del 2022]. Disponible en: <https://www.windturbinestar.com/300w-vertical-wind-turbine.html>

Algunas de las características de este aerogenerador son: tiene un peso de 10kg, las palas son hechas de aleación de aluminio, viene con su respectivo controlador, el rotor cuenta con una altura de 1.6 m, el diámetro del rotor es de 1.2 m, tiene una vida útil de 20 años, tiene una velocidad de arranque de 1.5 m/s y una velocidad nominal de 10 m/s. A continuación, en la figura 63 se muestra la curva de potencia para este aerogenerador, la cual será necesaria para poder llevar a cabo el análisis técnico-económico.

Figura 63. Curva de potencia Aerogenerador Vertical Aeolos V-300W.



Fuente: RESIDENTIAL VERTICAL AXIS WIND TURBINE - AEOLOS 300W Vertical Aeolos Wind Turbine Company [página web]. [Consultado: 1 de septiembre del 2022]. Disponible en: <https://www.windturbinestar.com/300w-vertical-wind-turbine.html>

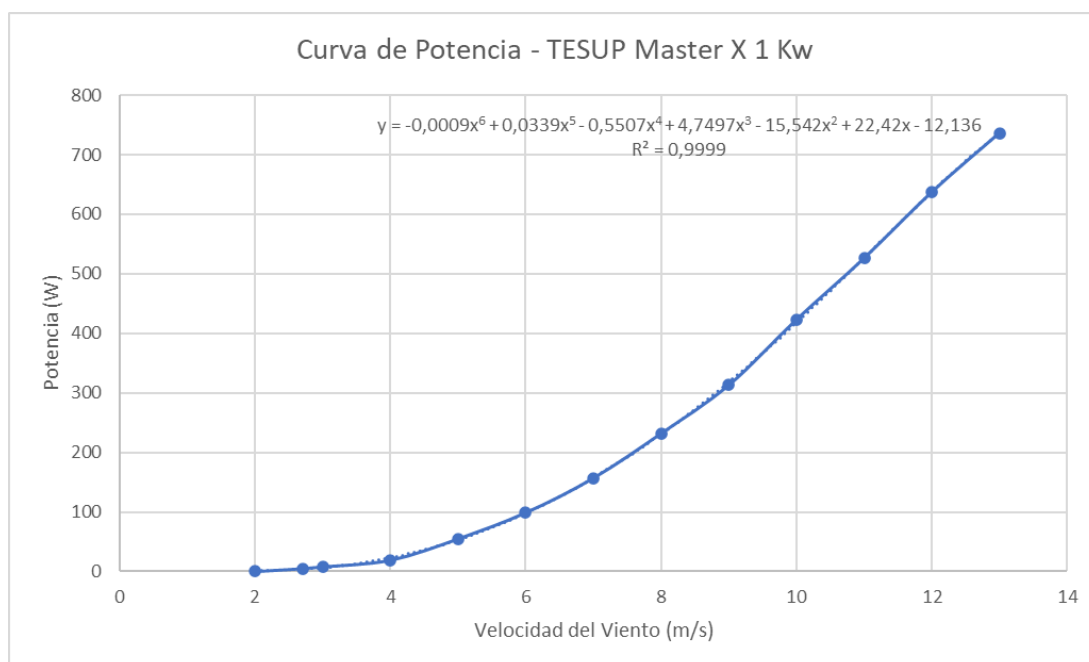
8.3 ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO Y SELECCIÓN FINAL DEL AEROGENERADOR

Cuando ya se determinaron los equipos más viables según la descripción dada en el capítulo 7.2, el paso siguiente es realizar el análisis técnico-económico para poder seleccionar el aerogenerador más viable económicamente basado en la estimación diaria de producción de energía. En resumen, lo que se busca hacer con este proceso es primeramente replicar cada una de las curvas de potencia de estos aerogeneradores en una gráfica de Excel, para poder obtener una ecuación que describa el comportamiento de la potencia real generada por los equipos en función de la velocidad del viento, y posteriormente realizar una estimación de la energía producida durante un día tipo en el sitio de interés, por medio de las velocidades promedio horarias del día tipo obtenidas con ayuda del software WAsP Climate Analyst 3.1 y anteriormente mostradas en la tabla 4. Una vez conocida esta estimación de energía producida durante el día, y conociendo

el valor del kWh establecido por la compañía encargada de la distribución de la energía eléctrica en la zona de estudio, se puede realizar un análisis económico para poder determinar en cuanto tiempo se podrá recuperar la inversión del proyecto.

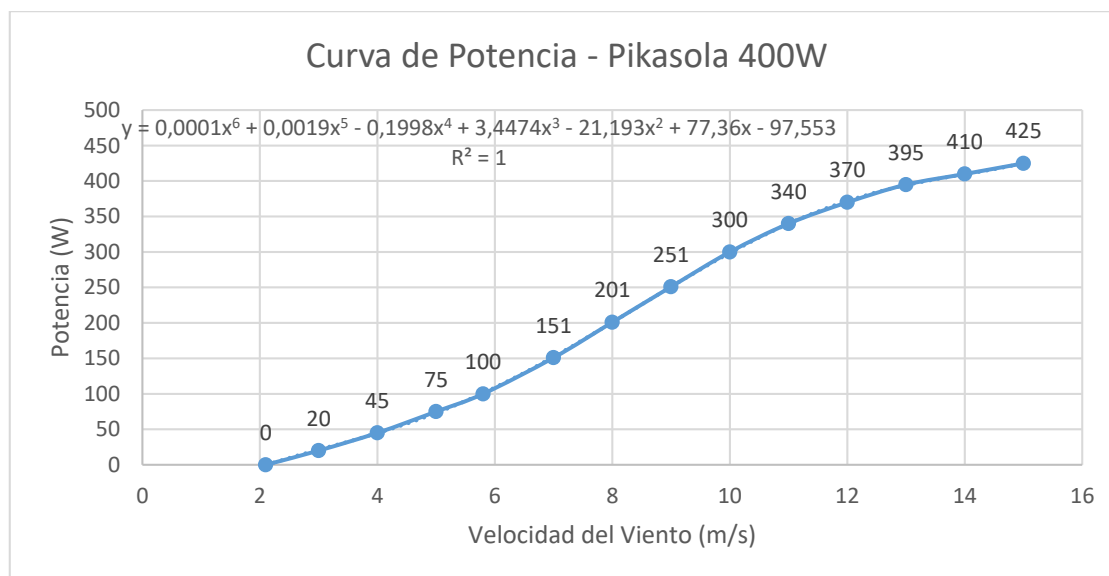
En las Figuras 62, 63 y 64 mostradas a continuación se muestran las gráficas de potencia real generada en función de la velocidad del viento y las ecuaciones correspondientes de estas para cada uno de los aerogeneradores preseleccionados, estas ecuaciones se consiguieron con Excel mediante la función 'línea de tendencia' de tipo exponencial y buscando que el valor de R^2 , fuera el más cercano a 1; además se buscó coherencia en los resultados de la estimación de la producción de energía diaria a partir de dicha ecuación. El documento Excel con todos los gráficos y ecuaciones de potencia de cada aerogenerador preseleccionado se puede visualizar en el Anexo F.

Figura 64. Gráfica y ecuación de potencia real generada en función de la velocidad del viento para el Aerogenerador TESUP Master X 1kW.



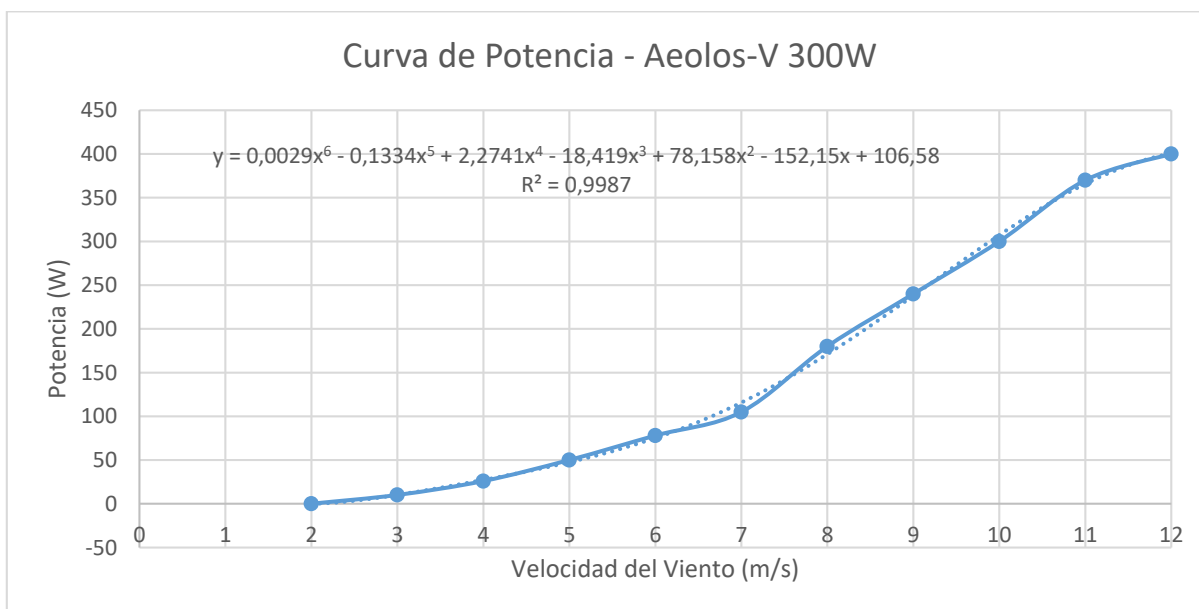
Fuente: Autores del proyecto.

Figura 65. Gráfica y ecuación y ecuación de potencia real generada en función de la velocidad del viento para el Aerogenerador Pिकासola 400W.



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 66. Gráfica y ecuación de potencia real generada en función de la velocidad del viento para el Aerogenerador vertical Aeolos V-300W.



Fuente: Autores del proyecto.

Teniendo ya las ecuaciones de potencia que se obtuvieron en Excel, se procedió a crear una tabla paramétrica con ayuda del software Engineering Equation Solver (EES), $y = f(x)$, donde y corresponde a la potencia (Wh) y x corresponde a la velocidad promedio horaria del día tipo (Tabla 4). Se determinó así para cada caso la estimación de potencia diaria generada para cada aerogenerador. Este archivo EES que contiene la tabla paramétrica usada para hacer los cálculos de potencia real se puede visualizar en el Anexo G.

Además, según se mencionó en el capítulo 5.3.3, dado a que se evidencia un patrón en el comportamiento del viento en dicho sitio, esta producción estimada diaria, se lleva a una producción anual, es decir, bastó con multiplicar por 365 días y se obtuvo un estimado de producción anual para cada equipo. En las Tablas 5, 6 y 7, se evidencia los resultados de producción diaria y anual para cada equipo.

Tabla 5. Potencia real diaria generada del aerogenerador TESUP Master X 1kW.

TESUP Master 1X		
Hora	Vprom(m/s)	P(W)
0	1,5	0
1	1,2	0
2	1	0
3	0,9	0
4	0,7	0
5	0,6	0
6	0,5	0
7	0,6	0
8	0,8	0
9	1,4	0
10	2,1	0,99
11	2,4	2,066
12	2,9	5,482
13	3,7	16,62
14	4,5	36,11
15	4,8	45,71
16	4,7	42,37

17	4,3	30,41
18	3,6	14,8
19	3	6,463
20	2,7	3,834
21	2,2	1,284
22	1,9	0
23	1,5	0
Wh-d		206,1
Wh-Año		75240,7
KWh-Año		75,2

Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 6. Potencia real diaria generada del aerogenerador Pikasola 400W.

Pikasola 400W		
Hora	Vprom(m/s)	P(W)
0	1,5	0
1	1,2	0
2	1	0
3	0,9	0
4	0,7	0
5	0,6	0
6	0,5	0
7	0,6	0
8	0,8	0
9	1,4	0
10	2,1	0
11	2,4	0
12	2,9	18,95
13	3,7	37,3
14	4,5	57,96
15	4,8	66,75
16	4,7	63,74
17	4,3	52,45
18	3,6	34,93
19	3	21,22
20	2,7	14,37
21	2,2	0

22	1,9	0
23	1,5	0
Wh-d		367,7
Wh-Año		134199,6
KWh-Año		134,2

Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 7. Potencia real diaria generada del aerogenerador vertical Aeolos V-300W.

Aeolos-V 300W		
Hora	Vprom(m/s)	P(W)
0	1,5	0
1	1,2	0
2	1	0
3	0,9	0
4	0,7	0
5	0,6	0
6	0,5	0
7	0,6	0
8	0,8	0
9	1,4	0
10	2,1	0,1909
11	2,4	2,367
12	2,9	8,639
13	3,7	21,77
14	4,5	36,62
15	4,8	42,77
16	4,7	40,67
17	4,3	32,73
18	3,6	20,02
19	3	10,14
20	2,7	5,843
21	2,2	0,7352
22	1,9	0
23	1,5	0
Wh-d		222,5
Wh-Año		81210,7
KWh-Año		81,2

Fuente: Autores del proyecto.

Una vez que se conocen todos valores de potencia estimada diaria generada para cada uno de los aerogeneradores y el valor de la energía eléctrica en el lugar donde se está llevando a cabo el proyecto (figura 67), se hizo otra tabla con ayuda de Excel para poder calcular un estimado del dinero que sería posible ahorrar durante todo un año de producción bajo estas velocidades del viento de un día tipo (Tabla 8). Es importante tener en cuenta que el valor de la energía utilizada para realizar este cálculo incluye el valor total del servicio prestado, incluyendo generación, distribución nacional, distribución local y todos los demás factores que se cobran en la factura mensual de la energía. Todos los valores de dinero mostrados en la tabla se encuentran en pesos colombianos.

Figura 67. Valor de la energía eléctrica en el departamento del valle del cauca para el año 2022.

INFORMACIÓN SOBRE TARIFAS

CELSIA COLOMBIA S.A. E.S.P. informa a sus clientes regulados conectados a sus redes, en el VALLE DEL CAUCA, las tarifas de prestación del servicio de energía eléctrica vigentes, calculadas con base en las resoluciones CREG 031/97, 119/07(Fórmula Tarifaria), 101 002-2022(Compras de energía), 174/2021(Compras de energía de AGPE y GD), 103/00(Cargos Uso STN), 019/07(IPP), 010/09(IPC), 058/08 y 133/13(Cargos ADD), 180 y 191/14(remuneración comercialización), 229/16(Costos de Comercialización), 036/06(Garantías Financieras), 015 y 085/18, 036 y 199/19(Metodología cargos uso STR SDL), 137/19(aprobación cargos por uso), 012 y 058/20(Opción Tarifaria), 003/21 y 214/21(Subsidios estratos 1-2) y Resoluciones UPME 0355/04 y 013/05(consumos subsistencia)

Los siguientes cargos sustituyen a los publicados el pasado 16 de septiembre de 2022

1. TARIFAS PARA EL MERCADO RESIDENCIAL (\$/kWh)

CS: Consumo de Subsistencia es 173 kWh/mes en municipios con altura inferior a 1000 msnm y 130 kWh/mes en otros.
En barrios subnormales, CS es 184 kWh/mes en municipios con altura inferior a 1000 msnm y 138 kWh/mes en otros.



CELSIA
La energía que quieres

Septiembre 30 de 2022



Vigilado
Superservicios

ESTRATO	PROPIEDAD DE CELSIA		PROPIEDAD DEL CLIENTE	
	CU1 0-CS (\$/kWh)	Consumo mayor a CS (\$/kWh)	CU1 sin inv. 0-CS (\$/kWh)	Consumo mayor a CS (\$/kWh)
1	319.51	798.76	284.89	712.21
2	399.38	798.76	356.12	712.21
3	678.95	798.76	605.38	712.21
4	798.76	798.76	712.21	712.21
5 y 6	958.51	958.51	854.65	854.65

Fuente: CELSIA. Información sobre tarifas. [página web]. [1 de septiembre del 2022].
Disponble en: https://www.celsia.com/wp-content/uploads/2022/10/Celsia-Colombia_Valle-sept-2022-1.pdf

Tabla 8. Calculo estimado del dinero que sería posible ahorrar diaria y anualmente para cada aerogenerador.

AEROGENERADOR	POTENCIA ESTIMADA DIARIA GENERADA (Wh)	VALOR DE LA ENERGÍA \$/kWh	DINERO AHORRADO DIARIO	DINERO AHORRADO ANUAL
TESUP Master X 1kW.	206,1	\$798.76	\$ 165	\$60.099
Pikasola 400W.	367,7	\$798.76	\$ 284	\$ 107.193
vertical Aeolos V-300W.	222,5	\$798.76	\$178	\$64.870

Fuente: Autores del proyecto.

Ya que se conoce el valor anual ahorrado con cada aerogenerador, con ayuda de la Ecuación 15 se procede a calcular el tiempo en años que tardará en recuperarse la inversión del aerogenerador. En este cálculo, para el caso del presente proyecto específicamente, se despreció la tasa de interés a la cual aumenta el valor de la energía años tras año, ya que, para el caso de Colombia, esta tasa se encuentra directamente relacionada con la tasa de inflación anual del país, por lo cual se puede concluir, que el aumento del ahorro anual que se tendría debido al aumento del costo de la energía, sería nulo, ya que el valor del dinero en Colombia iría perdiendo valor a través del tiempo a la misma tasa. Para el caso del departamento del Valle del Cauca, que fue donde se llevó a cabo este proyecto, el aumento anual de la energía eléctrica en el año 2022 fue de un 13,20% y el aumento de la inflación en Colombia para el año 2022 fue 13,12%.

$$P_{\text{retorno}} = \frac{I_{\text{total}}}{G_{pp}} \text{ (Ecu. 15)}$$

Donde P_{retorno} es igual a los periodos de retorno, I_{total} es igual a la inversión total y G_{pp} es igual a ganancias promedio por periodo, para cada equipo según corresponda.

A continuación, en las ecuaciones 16, 17 y 18 se muestra el número de años que se tardaría en recuperar la inversión hecha con cada uno de los aerogeneradores.

$$P_{\text{retorno},A1} = \frac{I_{\text{total},A1}}{G_{pp,A1}} = \frac{\$5.228.490}{\$60.099} = 87 \text{ Años (Ecu. 16)}$$

$$P_{\text{retorno},A2} = \frac{I_{\text{total},A2}}{G_{pp,A2}} = \frac{\$1.786.578}{\$107.193} = 17 \text{ Años (Ecu. 17)}$$

$$P_{\text{retorno},A3} = \frac{I_{\text{total},A3}}{G_{pp,A3}} = \frac{\$7.677.000}{\$64.868} = 118 \text{ Años (Ecu. 18)}$$

Tabla 9. Resultados del análisis técnico-económico de los tres aerogeneradores seleccionados.

AEROGENERADOR	POTENCIA REAL ANUAL GENERADA (KWh)	DINERO AHORRADO ANUAL	NUMERO DE AÑOS PARA EL RETORNO DE LA INVERSIÓN
TESUP Master X 1kW.	75,2	\$60.099	87
Pikasola 400W.	134,2	\$ 107.193	17
Aeolos-V 300W.	81,2	\$64.870	118

Fuente: Autores del proyecto.

En conclusión, el aerogenerador que presenta un periodo de retorno a la inversión más rápido es el Pikasola 400W, ya que el valor de la inversión total hecha en el equipo tardara 17 años en recuperarse completamente. Según los resultados obtenidos se pudo confirmar lo que ya se había previsto para en este caso en específico con los resultados arrojados por el software WASP Climate Analyst 3.1, de que este proyecto no es viable económicamente, ni es eficiente, ya que el potencial eólico disponible en el sitio es muy bajo y no representa ninguna oportunidad de rentabilidad. Esto teniendo en cuenta que la vida útil de los aerogeneradores preseleccionados es de 20 años, y según Celsia²⁰, para que un proyecto de energía renovable sea viable, debería tener un retorno a la inversión en promedio de 5 a 7 años, para que así se pueda obtener unas utilidades durante el resto de la vida útil del equipo.

Cabe resaltar que el propósito de este análisis técnico-económico fue determinar objetivamente la viabilidad de implementar un sistema eólico basado en las condiciones meteorológicas del sitio; considerando que algunos fabricantes y/o distribuidores de aerogeneradores en Colombia realizan una falsa estimación de retorno a la inversión, ya que utilizan la potencia nominal del equipo, un total de horas diarias de viento y un valor estandarizado de la energía eléctrica en el país (Valor erróneo en algunos caso, ver figura 68), despreciando que la potencia real generada por el equipo dependerá de las velocidades del viento presentes en el sitio de instalación y del valor real de la energía en el lugar específico donde este se instale. En la figura 68, se puede observar un ejemplo de lo que se acaba de explicar.

Figura 68. Ejemplo de estimación del dinero que se puede ahorrar utilizando aerogeneradores, hecho por uno de los fabricantes y distribuidores de aerogeneradores en Colombia.

²⁰ CÓMO CALCULAR EN ROI EN PROYECTOS DE ENERGÍA SOLAR. Eficiencia energética y energía solar en Colombia. Celsia [página web]. [Consultado: 1 de septiembre del 2022]. Disponible en: <https://blog.celsia.com/new/roi-en-energia-solar>

Una estimación aproximada de cuánto puede ahorrar con nuestros aerogeneradores

Horas de viento (total diario):

Selecciona tu aerogenerador:

Precio de la electricidad esperado \$(COP)/kWh: **3.044**

Anual = 1111060.00 \$

Fuente: AEROGENERADOR MASTER X. TESUP CO [página web]. [Consultado: 1 de septiembre del 2022]. Disponible en: <https://www.tesup.com.co/>

9. ADQUISICIÓN, MONTAJE Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL AEROGENERADOR

Una vez que se determinó que el aerogenerador Pikasola 400W es el más viable para la instalación del sistema eólico en el sitio, se procedió a buscar algunas ofertas en tiendas de energía renovables en Colombia y en el mercado online, sin embargo, para la fecha que se comenzó este proceso (noviembre 2021) en Colombia y en el mundo entero se presentaba un gran desabastecimiento de estos equipos, debido a la paralización de la economía y de las importaciones a causa del Covid 19. Las únicas ofertas disponibles en ese momento se encontraban en tiendas online como Amazon y Mercado Libre, y eran equipos que no se incluyeron en el estudio del Capítulo 7, además, eran equipos genéricos que en la mayoría de los casos no presentaban la información técnica respectiva y de los cuales no se podría asegurar ninguna confiabilidad. La mayoría de las ofertas estaban sujetas a procesos de importación de los cuales no se contaba con tiempos establecidos, debido a la misma problemática que el mundo atravesaba.

Durante este seguimiento a las ofertas disponibles de aerogeneradores, se encontró una oferta llamativa en Mercado Libre de una empresa en Colombia que se encontraba en un proceso de liquidación y cierre de operaciones, la cual tenía en su poder algunos equipos “Aeolos V-300W” nuevos y los estaban vendiendo en un precio muy por debajo del valor comercial. Se procedió a hacer el acercamiento con la persona encargada de la empresa (la cual quiso mantenerse anónima), en cuestión y se le dio a conocer el proyecto que se estaba llevando a cabo, a lo cual esta persona respondió de forma muy positiva que estaba dispuesto a vender uno de estos equipos para que fuese usado en el presente proyecto, en un precio de \$1´200.000 pesos colombianos, un precio aún mucho menor del que ya se encontraban, con la única condición de que los autores del proyecto se tenían que encargar del proceso de transporte y los costos asociados a este. Teniendo esta oportunidad y conociendo que este dispositivo es de un fabricante bastante reconocido, cuenta con unas especificaciones excelentes y que su valor real en el mercado es mucho más alto, se decidió realizar la compra de dicho equipo.

Para finalizar la compra, lo primero que se hizo fue viajar hasta la ciudad de Bogotá que se iba a adquirir y encargarse de todo el proceso de transporte de este. Como se muestra en la figura 69, se evidenció que el equipo estaba totalmente nuevo ya que no se habían abierto y aun se encontraban en la caja de embalaje de importación.

Figura 69. Adquisición del Aerogenerador Vertical Aeolos V-300W.



Fuente: Autores del proyecto.

El siguiente paso fue alquilar una camioneta que transportara el equipo desde la ciudad de Bogotá hasta el sitio de aplicación del proyecto, el cual tuvo un costo aproximado de \$250.000 pesos colombianos.

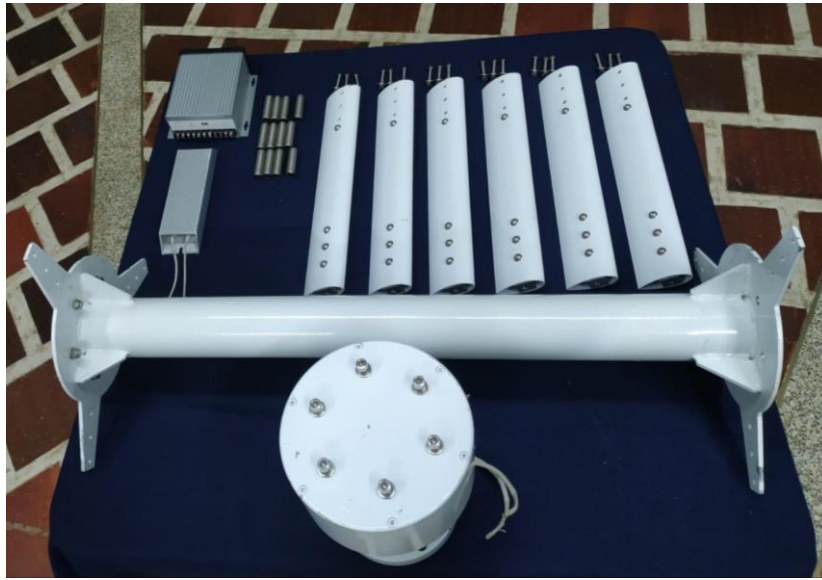
Figura 70. Transporte del Aerogenerador Vertical Aeolos V-300W desde Bogotá a el sitio de instalación.



Fuente: Autores del proyecto.

Una vez estando el equipo en la fincha La Chabela, se procedió a sacar y alistar todas las piezas para poder realizar el ensamblaje del aerogenerador con ayuda del manual del equipo. El manual del Aerogenerador seleccionado se puede observar en el Anexo H y el Brochure de especificaciones en el Anexo I.

Figura 71. Ensamblaje del Aerogenerador Vertical Aeolos V-300W, primera parte.



Fuente: Autores del proyecto.

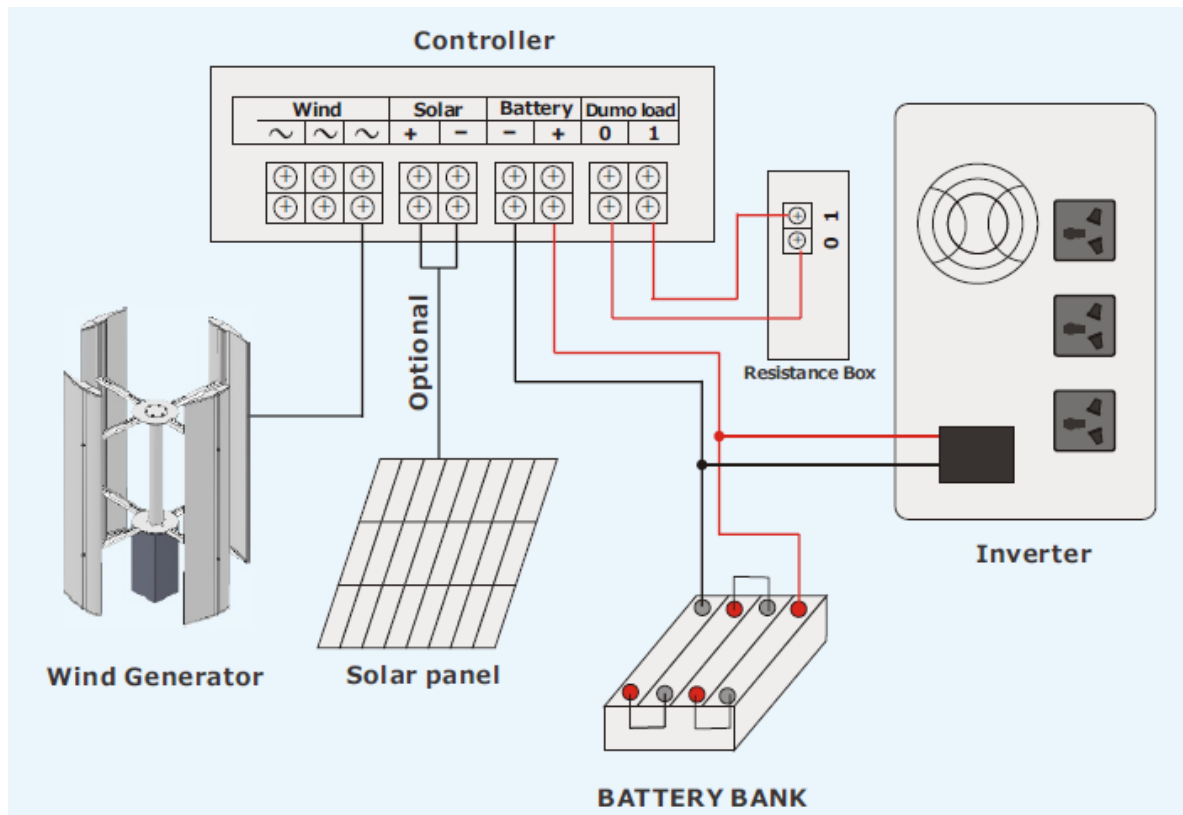
Figura 72. Ensamblaje del Aerogenerador Vertical Aeolos V-300W, segunda parte.



Fuente: Autores del proyecto.

Como se observa en la figura 73, para poder realizar la instalación del equipo, el manual del fabricante especifica cuáles son los otros componentes necesarios para poder poner en marcha el sistema eólico.

Figura 73. Diagrama del sistema eólico recomendado por el fabricante.

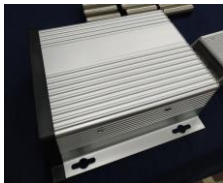


Fuente: <https://www.windturbinestar.com/Aerogenerador-300w.html>

Ya conociendo todos los componentes necesarios para poder realizar la instalación y puesta en marcha del sistema eólico, y teniendo en cuenta que el equipo viene con su respectivo controlador y caja de resistencias, se procedió a realizar la compra del inversor, las baterías y el cableado. Además, se tomó la decisión de comprar también unos interruptores de circuitos, más conocidos como brakers, con el fin de proteger los componentes del sistema de algún daño que pudiera causar algún corto circuito o una sobrecarga.

Los precios y especificaciones de todos los componentes utilizados en el sistema eólico se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Precios y especificaciones de los componentes eléctricos necesarios para la instalación del sistema eólico.

NOMBRE	ESPECIFICACIONES	PRECIO	FOTOS
Controlador	Suministrado por el Fabricante del Aerogenerador. Controlador híbrido eólico/solar.	N/A	
Caja de resistencia	Resistencia de 300 W	N/A	
Inversor	Inversor Onda Pura 300W Marca: Victron Ref: Phoenix 24/375 Pot Nom: 300 W Pot Pico: 700 W	\$535.000	
Baterías	2 Baterías libre de mantenimiento Magna SMA 100-12 2 Baterías 100 Ah 12V	\$2.087.000	
Protecciones	Se usaron 6 Brakers para montaje en riel 1 Polo termomagnético de 32 Amperios	\$78.000	

Cableado	• Cable multifilar AWG # 8 (conexión entre Baterías, inversor y controlador) • Cable AWG # 10 (cableado Controlador – Aerogenerador, Inversor – Portada) • Cable dúplex # 12 (otras conexiones sistema iluminación)	\$500.000	
-----------------	---	-----------	---

Fuente: Autores del proyecto

Teniendo todos los componentes para la instalación del sistema eólico, se buscó un lugar específico de la finca para instalarlo, que estuviera alejado de las edificaciones para que se aprovechara de mejor manera el viento existente. Se determinó que el mejor lugar en la finca para instalar el sistema era un poste de energía que no se estaba usando (figura 74), el cual no presentaba ningún problema estructural y estaba en perfecto estado, y ubicado en una cancha alejada de las edificaciones y tiene una altura de 13 m desde el suelo, lo cual lo hacía el lugar más adecuado para realizar el montaje según lo recomendado por el fabricante.

Figura 74. Lugar adecuado para la instalación del sistema eólico.



Fuente: Autores del proyecto.

Para poder realizar la instalación del sistema, también fue necesario comprar un acople (figura 75) para que el aerogenerador se pudiera ensamblar con el poste, el cual tuvo un valor de \$350.000 pesos colombianos. Este acople se mandó a fabricar en una empresa metalmecánica en la ciudad de Bogotá, los cuales se apoyaron en el manual del fabricante que los autores del proyecto pusieron a su disposición y en el modelo del poste. Figura 75. Acople para el ensamble del aerogenerador en el poste.



Fuente: Autores del proyecto.

Además del acople, también se construyó una pequeña edificación en donde se pudieran resguardar los demás componentes del sistema eólico (figura 76), ya que, si se dejaban expuestos, el sol y el agua podrían dañar estos componentes electrónicos. Esta construcción fue realizada por los autores del proyecto y solo tuvo un costo de \$200.000 pesos colombianos, correspondientes a los materiales utilizados.

Figura 76. Edificación de resguardo de los componentes del sistema eólico.



Fuente: Autores del proyecto.

Una vez se tuvo todo preparado, se puso en marcha el proceso de instalación y montaje del sistema eólico (figura 77). Lo primero que se realizó fue el montaje del aerogenerador en el poste, el cual se hizo con la ayuda de una persona capacitada, y tuvo un valor de \$250.000 pesos colombianos, referentes a la mano de obra.

Figura 77. Proceso de montaje del aerogenerador en el poste.



Fuente: Autores del proyecto.

Una vez se instalado el aerogenerador, se realizó la instalación y de los demás componentes del sistema eólico (figura 78) con ayuda del manual del fabricante, como se mostró en la figura 73. Este proceso fue llevado a cabo en su totalidad por los autores del presente proyecto.

Figura 78. Proceso de instalación de los componentes electrónicos del sistema eólico.



Fuente: Autores del proyecto.

Una vez instalados todos los componentes del sistema eólico, se puso en funcionamiento y se revisó con ayuda de un multímetro que todo estuviera funcionando de manera correcta (figura 79).

Figura 79. Revisión de los componentes del sistema eólico instalado.



Fuente: Autores del proyecto.

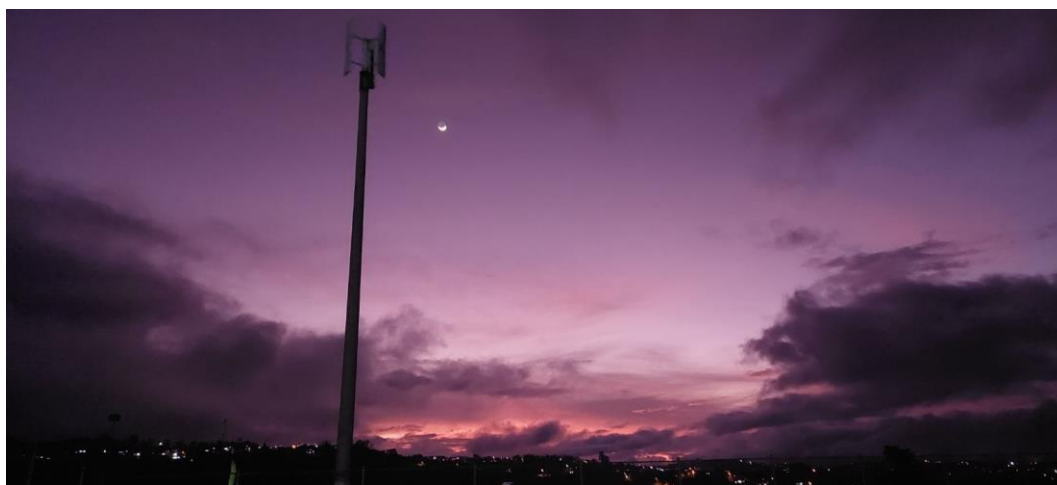
Finalmente, en las figuras 78 y 79, se muestra el sistema eólico instalado en su totalidad y en pleno funcionamiento.

Figura 80. Sistema eólico de baja potencia instalado.



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 81. Sistema eólico de baja potencia instalado en funcionamiento.



Fuente: Autores del proyecto.

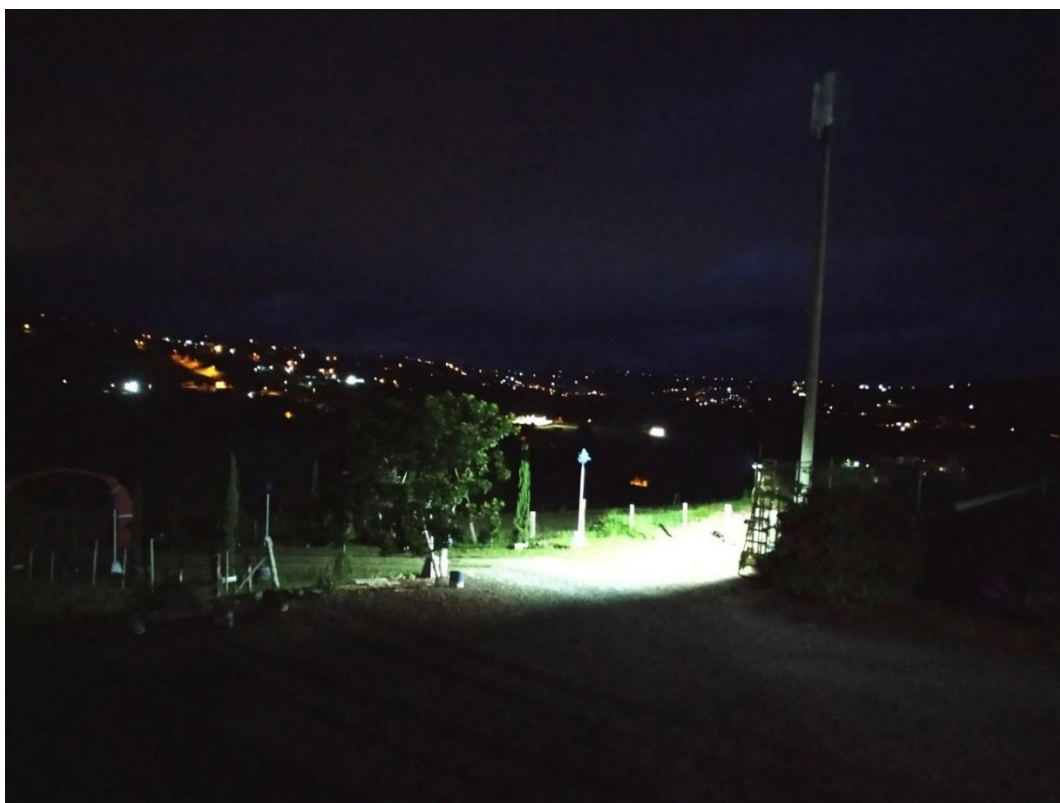
Al pasar dos días desde de la instalación, se comprobó que las baterías se encontraban cargando y se prosiguió a conectar unas lámparas que brindan iluminación a la entrada de la finca La Chabela, las cuales funcionaron completamente.

Figura 82. Comprobación del funcionamiento mediante la medición de carga de las baterías del sistema.



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 83. Lámparas en funcionamiento con la energía eólica aprovechada por el sistema instalado.



Fuente: Autores del proyecto.

A continuación, en la tabla 11 se muestran los costos asociados a todos los componentes del sistema eólico y el costo total estimado del sistema. Cabe resaltar que todos los costos acá mencionados fueron asumidos por los autores del proyecto.

Tabla 11. Costos del sistema eólico instalado.

NOMBRE	COSTOS (COP)
Aerogenerador, controlador y caja de resistencias.	\$1'200.000
Inversor	\$535.000
Baterías x2	\$2'087.000
Brakers x6	\$78.000
Cableado y tuberías	\$500.000
Acople del aerogenerador	\$350.000

Estructura para los componentes	\$200.000
Transporte	\$250.000
Instalación	\$250.000
TOTAL	\$5'450.000

Fuente: Autores del proyecto.

10. CONCLUSIONES

- Se comprobó que la mejor forma de poder determinar el potencial eólico de un sitio específico es mediante la medición in-situ de las condiciones meteorológicas del viento, ya que esto permitirá obtener un panorama real y no aproximado de las condiciones del viento presentes, con lo cual se podrá tener un punto de partida sólido y se determinará con mayor precisión, si es viable implementar un sistema eólico en dicho lugar.
- Con ayuda del software WeatherLink que permite visualizar los datos recopilados por la estación meteorológica en forma de gráficas, se evidenció que existe un patrón de ocurrencia de las velocidades del viento durante el día y repetitivo durante todo el mes. Debido a que en el presente proyecto solo se obtuvieron datos del viento correspondientes a 4 meses del año, basándose en este patrón se hizo la suposición que en la finca La Chabela el comportamiento del viento es similar durante todos los días del año y se tomó la decisión de calcular la potencia real anual producida por cada aerogenerador preseleccionado con base en las velocidades promedios del día tipo.
- Para realizar el cálculo del potencial eólico y los análisis estadísticos correspondientes se recomienda el uso del software WASP Climate Analyst 3.1, ya que es un programa de acceso libre que cuenta con fundamentación teórica, fue diseñado por una institución de renombre en la industria de la energía eólica (Universidad Técnica Danesa) que brinda confiabilidad y que permite realizar todos los cálculos de manera sencilla y eficiente. Además, este software cuenta con una interfaz bastante amigable y fácil de comprender, lo cual permite que otras personas sin conocimientos matemáticos o teóricos sobre el cálculo del potencial eólico puedan usarlo y obtener un resultado bastante seguro y confiable.
- Según los resultados del potencial eólico obtenidos, se evidenció que el sector 11, que corresponde al Angulo de 300° , es donde se presenta la mayor velocidad del viento

con un promedio 3,41 m/s, una frecuencia de aparición del 40,5%, y es de la dirección donde se obtendría la mayor densidad de potencia con un valor de 38 W/m². Aunque estos datos corresponden a una velocidad y a una densidad de potencia considerables, no son suficientes, debido a que el resultado final depende directamente del promedio de todos los resultados de cada sector. Estos resultados también muestran que, en 9 de los 12 sectores, la velocidad promedio no alcanzó a superar los 1,5 m/s, lo que indica que el viento proveniente de estas direcciones no es suficiente para poder mover un aerogenerador con un umbral de calma de 1,5 m/s.

- Mediante la implementación de la metodología se comprobó que en la finca La Chabela, donde se llevó a cabo el presente proyecto, no es viable técnica ni económicamente la implementación de un sistema eólico de baja potencia, debido a que la densidad de potencia eólica presente es de 22W/m² despreciando el límite de Betz, lo cual hace que el proyecto no presente ninguna oportunidad de rentabilidad teniendo en cuenta los altos costos de implementación de un sistema eólico en Colombia.
- Los factores decisivos que se tuvieron en cuenta al momento de seleccionar el tipo de aerogenerador que se debe implementar teniendo en cuenta los datos del viento recopilados en el presente proyecto fueron: la variabilidad del viento, la velocidad de arranque y la velocidad nominal.
- Un análisis técnico-económico basado en los datos del viento presentes en el sitio y las curvas de potencia dadas por los fabricantes de los aerogeneradores, permitirá seleccionar el aerogenerador más adecuado según el potencial eólico del sitio, mediante la estimación de la potencia generada por estos equipos, la rentabilidad asociada a esta generación y el tiempo de retorno a la inversión que tardaría cada uno de estos.

- Según los resultados arrojados en el análisis técnico-económico realizado, el aerogenerador más adecuado para la adquisición fue el Pikasola 400W con un valor de \$1'786.578 pesos colombianos, ya que esta inversión tardara 17 años en recuperarse completamente. Aunque para el caso específico del presente proyecto este resultó ser el equipo más conveniente, se debe tener en cuenta que sigue siendo una inversión no viable, ya que la vida útil de la maquina es de 20 años, solo aportaría 3 años de rentabilidad, y usualmente para que un proyecto de energía renovable sea viable, debería tener un retorno a la inversión en promedio de 5 a 7 años.
- Aunque el análisis técnico-económico realizado determinó que el aerogenerador más adecuado para la adquisición era el Pikasola 400W, durante el proceso de compra se encontró una oferta de un aerogenerador vertical Aeolos V-300W con un valor de \$1'200.000 pesos colombianos, y dado que este equipo se encontraba a un precio más bajo que el Pikasola 400W, se tomó la decisión de adquirirlo debido a que representaba una menor inversión económica para los autores del proyecto.
- Para poder llevar a cabo la instalación de un sistema eólico, es necesario tener en cuenta la adquisición de otros dispositivos que permitirán el correcto funcionamiento del sistema (Inversor, baterías, cableado, protecciones, tuberías), además de un lugar adecuado donde se puedan instalar estos dispositivos. También se debe disponer de una estructura donde se pueda instalar el aerogenerador, teniendo en cuenta las recomendaciones dadas por el fabricante.
- Se llevó a cabo la instalación del aerogenerador vertical Aeolos V-300W y de todos los demás componentes, y se puso en funcionamiento todo el sistema eólico. Se evidenció que el sistema se encuentra funcionando correctamente, aprovechando el poco potencial eólico disponible al cargar las baterías del sistema y está brindando energía a unas lámparas que dan iluminación a la entrada de la finca La Chabela.

11. RECOMENDACIONES

- Realizar la toma de datos del viento y/o la instalación de la estación meteorológica en el lugar que se quiera realizar el estudio durante un periodo de tiempo de por lo menos 12 meses consecutivos, con el fin de que se pueda analizar el comportamiento del viento durante todos los días del año y que se puedan obtener resultados más precisos al momento de calcular el potencial eólico presente en el sitio.
- Se recomienda para proyectos futuros que planeen tomar datos en el sitio de interés mediante la instalación de una estación meteorológica, realizar chequeo constante de los datos obtenidos para evitar periodos de fallo en la toma de datos y que no se presente falta de datos que puedan alterar los análisis posteriores.
- Para proyectos futuros se recomienda implementar un datalogger que permita cuantificar la potencia producida horariamente por el aerogenerador para cuantificar la energía real que se produce en función del viento. Con base en esto se podrían hacer ajustes y comprobaciones acerca de la precisión de la metodología.
- Se recomienda implementar esta metodología en una zona costera o en otra zona donde se tenga previo conocimiento de altas velocidades de viento.
- Se recomienda ampliar la metodología a una que permita implementar sistemas renovables híbridos donde se haga aprovechamiento de los recursos presentes en una zona.

BIBLIOGRAFÍA

¿QUÉ ES la energía eólica? Conoce un sector de gran futuro en Colombia. Lecciona Colombia [página web]. [Consultado: 20 de enero del 2021]. Disponible en: <https://www.lecciona.com.co/que-es-la-energia-eolica/>

AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL. ArchiExpo [página web]. [Consultado: 1 de febrero del 2021]. Disponible en: <https://www.archiexpo.es/fabricante-arquitectura-design/aerogenerador-eje-horizontal-3856.html>

AEROGENERADOR MASTER X. TESUP CO [página web]. [Consultado: 1 de septiembre del 2022]. Disponible en: https://www.tesup.com.co/product-page/aerogenerador-maestrax-para-casa-Colombia?gclid=CjwKCAiAoL6eBhA3EiwAXDom5r-lxQDVEqgR7wjFxlRBDthw2VYcVtwlgSJQaZ4ZoybKhHFSTmjOphoCO80QAvD_BwE

AEROGENERADOR PIKASOLA 400W. Amazon.com [página web]. [Consultado: 1 de septiembre del 2022]. Disponible en: <https://www.amazon.com/Pikasola-Generator-Starting-Turbines-Controller/dp/B0897PHY5X>

AEROGENERADOR. MEDIDAS, POTENCIA, PARTES Y FUNCIONAMIENTO. [página web]. [Consultado: 1 de febrero del 2021]. Disponible en: <https://como-funciona.co/un-aerogenerador/>

AEROGENERADORES VERTICALES: partes, principio de funcionamiento, ventajas y desventajas. Eres Medio Ambiente [página web]. [Consultado: 1 de febrero del 2021]. Disponible en: <<https://eresmedioambiente.com/aerogeneradores-eolicos-verticales/>

ASOCIACIÓN DANESA DE LA INDUSTRIA EÓLICA. Función de densidad de potencia. [En Línea]. [Consultado: 24 de enero del 2021]. Disponible en: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/powdensi.htm>

ASOCIACIÓN DANESA DE LA INDUSTRIA EÓLICA. Ley de Betz. [En Línea]. [Consultado: 24 de enero del 2021]. Disponible en: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/betz.htm>

CELSIA. Información sobre tarifas. [página web]. [1 de septiembre del 2022]. Disponible en: https://www.celsia.com/wp-content/uploads/2022/10/Celsia-Colombia_Valle-sept-2022-1.pdf

CIEMAT, ESPAÑA. AEROGENERADORES DE POTENCIA INFERIOR A 100 KW.

CÓMO CALCULAR EN ROI EN PROYECTOS DE ENERGÍA SOLAR. Eficiencia energética y energía solar en Colombia. Celsia [página web]. [Consultado: 1 de septiembre del 2022]. Disponible en: <https://blog.celsia.com/new/roi-en-energia-solar>

ENERGÍA EÓLICA. Energía Renovable y Desarrollo Sostenible. DiselEnergy [página web]. [Consultado: 30 de agosto del 2022]. Disponible en: <https://diselenergy.com/energia-eolica->

2/#:-:text=La%20potencia%20que%20suministra%20el,eléctrica%20a%20partir%20de
%20aerogeneradores

Eraso-Checa, F., Escobar-Rosero, E., Paz, D.F., y Morales, C. (2018). Metodología para la determinación de características del viento y evaluación del potencial de energía eólica en Túquerres-Nariño. Revista Científica, 31(1), 19-31. Disponible en: <https://doi.org/10.14483/23448350.12304>

Fernández Díez, Pedro. Energía Eólica. [En Línea]. 2007. Capítulo 1 Fuentes Eólicas. [Consultado: 22 de enero del 2021]. Disponible en: <https://pfernandezdiez.es/es/libro?id=6>

Fuente: AEROGENERADOR MASTER X. TESUP CO [página web]. [Consultado: 1 de septiembre del 2022]. Disponible en: <https://www.tesup.com.co/>

GOMÁRIZ GAYÁ, Carlos. Estudio de sostenibilidad energética para una piscina de altas prestaciones. Barcelona, 15 de junio de 2015. Grado en: Ingeniería Civil. Escola De Camins. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental. 2015. P. 13.

GÓMEZ GARCÍA, Víctor. Estudio computacional de una turbina eólica de eje vertical H-Darrieus con perfiles NACA 4518. Valladolid España, septiembre de 2015. Grado en Ingeniería Mecánica. Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales. 2015. P. 8.

IDEAM. Atlas interactivo de vientos. [página web]. [Consultado: 20 de enero del 2021]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>

IDEAM. Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos. [página web]. [Consultado: 20 de junio del 2021]. Disponible en: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

IDEAM. Entidad. [página web]. [Consultado: 20 de enero del 2021]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/entidad/acerca-entidad>

INSAK. Estación inalámbrica Vantage Vue 6250. [página web]. [Consultado: 25 de junio del 2021]. Disponible en: https://www.insak.com.co/aym_image/files/03-ESTACI%c3%93N%20METEOROL%c3%93GICA%20DAVIS%20VANTAGE%20VUE%206250.pdf

J. Manwell, Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. James Manwell, Jon McGowan, Anthony Rogers. Second Edition. John Wiley and Sons Ltd. 2009.

LA MEMORIA DE LOS VIENTOS. EducaLAB [página web]. [Consultado: 21 de enero del 2021]. Disponible en: http://blog.intef.es/leer.es/WEB_MemoriadelosVientos/16circulacion.html

LAS BASES CIENTÍFICAS DE LA ENERGÍA EÓLICA. Actualidad del sector eólico en España y en el mundo [página web]. [Consultado: 25 de enero del 2021]. Disponible en: <https://www.evwind.com/2018/07/06/las-bases-cientificas-de-la-energia-eolica>

MEDIDAS DE LA VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO. [página web]. [Consultado: 25 de enero del 2021]. Disponible en: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/datos/viento/viento.html>

NACIONES UNIDAS. Desafíos Globales Cambio Climático. [En Línea]. [Consultado: 30 de febrero del 2023]. Disponible en: <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>

QUÉ ES UN AEROGENERADOR Y CÓMO FUNCIONA. Iberdrola [página web]. [Consultado: 1 de febrero del 2021]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/palas-aerogeneradores>

RESIDENTIAL VERTICAL AXIS WIND TURBINE - AEOLUS 300W Vertical Aeolus Wind Turbine Company [página web]. [Consultado: 1 de septiembre del 2022]. Disponible en: <https://www.windturbinestar.com/300w-vertical-wind-turbine.html>

ROTOR SAVONIUS. Wikipedia, la enciclopedia libre [página web]. [Consultado: 1 de febrero del 2021]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Rotor_Savonius

TOBÍAS SALAS, Alfredo. RUBIO JIMÉNEZ, Carlos Alberto. Estado del arte de aerogeneradores de eje horizontal y vertical. [En Línea]. [Consultado: 6 de febrero del 2021]. Disponible en: <http://repositorio.ugto.mx/bitstream/20.500.12059/4745/1/Estado%20del%20arte%20de%20aerogeneradores%20de%20eje%20horizontal%20y%20vertical.pdf>

UPME. Análisis área de estudio preliminar y alertas tempranas. BOGOTÁ D.C. Noviembre, 2017. [En Línea]. [Consultado: 20 de junio del 2021]. Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/ALERTAS-TEMPRANAS.pdf>

VIVAS, Julián. El mapa de 1.710 poblados que aún se alumbran con velas en Colombia. El Tiempo [página web]. [Consultado: 30 de febrero del 2023]. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/los-lugares-que-aun-viven-sin-energia-electrica-en-colombia->

325892#:~:text=Según%20información%20del%20Ipse,%20los,Antioquia;%20y%20Miraflores,%20Guaviare.

WIND RESOURCES FOR ENERGY PRODUCTION OF WIND TURBINES. WAsP [página web]. [Consultado: 10 de junio del 2022]. Disponible en: <https://www.wasp.dk/wasp>

WIND RESOURCES FOR ENERGY PRODUCTION OF WIND TURBINES. WAsP Climate Analyst [página web]. [Consultado: 10 de junio del 2022]. Disponible en: <https://www.wasp.dk/dataandtools/climate-analyst>