



Estudio de factibilidad en la implementación de un sistema de generación de energía eólica en la Finca El Puente municipio de Alpujarra Tolima

Manuel Alejandro Díaz Caviedes

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Ciudad, Colombia
2020

Estudio de factibilidad en la implementación de un sistema de generación de energía eólica en la finca El Puente municipio de Alpujarra Tolima

Manuel Alejandro Díaz Caviedes

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Mecánico

Director (a):

Karel Joel Arencibia Ávila. PhD.

Ingeniero Mecánico

Línea de Investigación:

Energía

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Ciudad, Colombia

2020

(Dedicatoria o lema)

*El fracaso es simplemente una nueva
oportunidad de empezar de nuevo, esta
vez de forma más inteligente.*

Henry Ford

Agradecimientos

Quiero dedicar y dar gracias a Dios, porque siempre está bendiciéndome, a mi madre porque con esfuerzo y dedicación estuvo para mí y me apoyo en todo este caminar en compañía de mis tíos “Luis, Aldemar, Gilberto y Enrique”, ellos me enseñaron el valor del trabajo duro, la responsabilidad, la humildad y la disciplina. A Jairo Perdomo por ayudarme con su beca la cual fue una gran bendición e hizo que me empujara con este gran sueño, a mi primo Carlos Roberto (Carlucho) quien me ayudo con el último impulso, el cual hoy hace que culmine mi carrera.

Un agradecimiento especial a mis profesores de secundaria “Celso Torres y José Heriberto Vargas” quienes me dieron las herramientas para realizar mis estudios profesionales.

Agradezco con todo mi corazón a mi amiga, compañera y esposa Judith España, y con toda mi alma a Kora Lilián Diaz España mi hija, ella mi motor mi mayor impulso para continuar con entusiasmo el camino, ella es mi Felicidad.

Resumen

Este trabajo analiza la factibilidad para la implementación de un sistema de generación de electricidad mediante el recurso eólico, y evaluar la posibilidad de usarlo en la finca El Puente municipio de Alpujarra Tolima. Esta investigación busca contribuir con una posible solución a las constantes interrupciones, variaciones en el voltaje y altos costos en el servicio de la energía eléctrica, ya que estas provocan serias afectaciones en la cadena de producción ganadera, agrícolas y en lo socio-económico del sector; todo esto aprovechando el potencial eólico característico de la zona.

El trabajo muestra una breve explicación de los antecedentes de generación eléctrica en Colombia, las emisiones atmosféricas y el efecto invernadero, características del viento en el país, que es un aerogenerador, tipos y características de estos, ventajas y desventajas que tiene la energía renovable, y los cálculos matemáticos para determinar la viabilidad de un aerogenerador en la finca.

Durante el estudio de factibilidad, se seleccionó la mejor alternativa de aerogenerador que cumpliera con todas las necesidades, tratando de reducir los costos de instalación y operación. Si los resultados del estudio, demuestran factibilidad, se solucionaría el problema eléctrico de la finca, ya que el aerogenerador cumpliría con la demanda de consumo eléctrico que esta necesita para su buen funcionamiento, así como su economía.

Más allá de que esta sea un simple estudio de factibilidad, este trabajo daría la suficiente información técnica para implementar un aerogenerador en la finca El Puente y en la comunidad Alpujarreña en General

Palabras clave: Viento, Eólica, Velocidad, Energía, Electricidad, Potencial, Factibilidad.

Abstract

This work analyzes the feasibility for the implementation of an electricity generation system through the wind resource, and evaluate the possibility of using it in the El Puente farm in the municipality of Alpujarra Tolima. This research seeks to contribute with a possible solution to the constant interruptions, voltage variations and high costs in the electric power service, since these cause serious effects on the livestock, agricultural production chain and on the socio-economic aspects of the sector; all this taking advantage of the wind potential characteristic of the area.

The work shows a brief explanation of the history of electricity generation in Colombia, atmospheric emissions and the greenhouse effect, characteristics of the wind in the country, which is a wind turbine, types and characteristics of these, advantages and disadvantages of renewable energy, and mathematical calculations to determine the viability of a wind turbine on the farm.

During the feasibility study, the best wind turbine alternative was selected that would meet all the needs, trying to reduce installation and operation costs. If the results of the study demonstrate feasibility, the farm's electrical problem would be solved, since the wind turbine would meet the demand for electrical consumption that it needs for its proper operation, as well as its economy.

Beyond this being a simple feasibility study, this work would provide sufficient technical information to implement a wind turbine in the El Puente farm and in the Alpujarra community in General.

Keywords: Wind, Wind, Speed, Energy, Electricity, Potential, Feasibility.

Contenido

	PÁG.
RESUMEN	IX
LISTA DE FIGURA	XIII
LISTA DE TABLAS	XIV
LISTA DE ECUACIONES	XV
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	XVI
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
METODOLOGÍA	3
JUSTIFICACIÓN	5
ALCANCE	6
1. ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO	7
1.1 ANTECEDENTES	7
1.2 EMISIONES ATMOSFÉRICAS Y EL EFECTO INVERNADERO.	11
1.2.1 <i>El metano (CH₄)</i>	12
1.4 CONCEPTOS DE ENERGÍA EÓLICA	20
1.4.1 <i>Rosa de Vientos</i>	20
1.4.2 <i>Clasificación de los Vientos</i>	21
1.4.3 <i>Vientos que llegan a Colombia</i>	22
1.5 AEROGENERADORES.	23
1.7 HUELLA DE CARBONO DE LA ENERGÍA EÓLICA.	27
2. ESTUDIO Y CÁLCULO DEL AEROGENERADOR	31
2.1 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO	31
2.2 RECOLECCIÓN DE DATOS CON ANEMÓMETRO	32
2.3 DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL	38
2.3.1 <i>Propiedades de la función de Weibull</i>	38
2.3.2 <i>Parámetros estadísticos de la distribución de Weibull</i>	39
2.3.3 <i>Parámetros para los cálculos energéticos</i>	40
2.3.4 <i>Cálculo de los parámetros de Weibull</i>	42

2.4	ANÁLISIS DEL POTENCIAL EÓLICO DISPONIBLE	46
2.5	CONSUMO ELÉCTRICO DE LA FINCA EL PUENTE	50
2.6	ELECCIÓN DEL AEROGENERADOR	51
2.6.1	<i>Cálculo de la potencia máxima del lugar de estudio.</i>	54
2.6.2	<i>Análisis exergético</i>	55
2.7	ESTIMACIÓN DEL SUMINISTRO DE ENERGÍA	57
2.8	ANÁLISIS FINANCIERO DEL PROYECTO	59
2.8.1	<i>Costos del aerogenerador y su instalación</i>	59
3.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
3.1	CONCLUSIONES.....	63
3.2	RECOMENDACIONES	64
BIBLIOGRAFÍA	67

Lista de figura

	PÁG.
FIGURA 1-1. UBICACIÓN DE LA FINCA EL PUENTE MUNICIPIO DE ALPUJARRA TOLIMA.....	3
FIGURA 1-1 CONCENTRACIÓN DE GASES EFECTO INVERNADERO.	13
FIGURA 1-2 EMISIONES DE CO2 EN PAÍSES.	13
FIGURA 1-3 EMISIONES DE CO2 POR DEPARTAMENTOS DE COLOMBIA.....	14
FIGURA 1-4. MAPA DE CORRIENTES DE VIENTO EN COLOMBIA.....	15
FIGURA 1-5. CORRIENTES DE VIENTO EN ALPUJARRA TOLIMA.	16
FIGURA 1-6. AEROGENERADOR.	16
FIGURA 1-7 HISTÓRICO DE INSTALACIONES TOTALES (EN TIERRA Y EN ALTA MAR) ENERGÍA EÓLICA.....	19
FIGURA 1-8 RANKING DE PAÍSES POR POTENCIA TERRESTRE ACUMULADA.....	19
FIGURA 1-9. ROSAS DE VIENTOS, SAN ALFONSO, VILLAVIEJA HUILA.	20
FIGURA 1-10. MAPA VIENTOS MÁS PROBABLES EN COLOMBIA.	22
FIGURA 1-11. EJE VERTICAL DARRIEUS.	23
FIGURA 1-12. EJE VERTICAL SAVONIUS.	23
FIGURA 1-13. EJE VERTICAL GIROMILL.....	23
FIGURA 1-14. EJE HORIZONTAL.	23
FIGURA 1-15. AEROGENERADOR MONOPALA - BIPALA.....	24
FIGURA 1-16. AEROGENERADOR TRIPALA.	24
FIGURA 1-17. AEROGENERADOR MULTIPALA.	24
FIGURA 1-18. AEROGENERADORES TIPO BARLOVENTO Y SOTAVENTO.....	25
FIGURA 1-19 RENDIMIENTO DE TIPOS DE AEROGENERADORES.....	26
FIGURA 1-20. PARTES DE UN AEROGENERADOR.	27
FIGURA 1-21 HUELLA DE CARBONO EN LAS FASES DEL CICLO DE VIDA DE UN PARQUE EÓLICO.	28
FIGURA 2-1. UBICACIÓN FINCA EL PUENTE.	32
FIGURA 2-2. INSTALACIÓN DEL ANEMÓMETRO.	33
FIGURA 2-3. ANEMÓMETRO UTILIZADO PARA EL PROYECTO.	33
FIGURA 2-4. PUNTOS TOMA DE DATOS.	34
FIGURA 2-5. SOFTWARE WASP CLIMATE ANALYST.....	36
FIGURA 2-6 DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL DE LOS DATOS TOMADOS.....	36
FIGURA 2-7 . FRECUENCIA ACUMULADA.....	37
FIGURA 2-8 RECTA POR MÍNIMO CUADRADO.	42
FIGURA 2-9 DISTRIBUCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE WEIBULL.	46
FIGURA 2-10. GPS TOMA DE MSNM.	48
FIGURA 2-11 DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS ACUMULADAS.....	52
FIGURA 2-12 GRÁFICA DE POTENCIA NOMINAL DEL AEROGENERADOR SELECCIONADO.....	54
FIGURA 2-13 FLUJO NETO DE EFECTIVO.....	62

Lista de tablas

	PÁG.
TABLA 1-1. PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD SEGÚN FUENTE DE ENERGÍA.	8
TABLA 1-2. NÚMERO DE PROYECTOS VIGENTES POR DEPARTAMENTO.	9
TABLA 1-3. PROYECTOS EÓLICOS EN COLOMBIA.	10
TABLA 1-4. FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES.	11
TABLA 1-5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA ENERGÍA EÓLICA.	18
TABLA 1-6. ESCALA DE BEAUFORT.	21
TABLA 1-7. EMISIÓN DE GASES GEI EMPRESAS ENEL Y VATTENFALL.	29
TABLA 2-1. TOMA DE DATOS EN LA FINCA EL PUENTE.	35
TABLA 2-2. TABLA DE DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA.	37
TABLA 2-3. DISTRIBUCIÓN GAMMA.	40
TABLA 2-4. CÁLCULO DE LOS DATOS ESTADÍSTICOS.	44
TABLA 2-5. CÁLCULO DE LA DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE WEIBULL.	45
TABLA 2-6. CONSUMO ELÉCTRICO FINCA EL PUENTE.	51
TABLA 2-7. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS FINCA EL PUENTE 48 HORAS.	52
TABLA 2-8. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS AEROGENERADOR ZONHAN ZH1.5.	53
TABLA 2-9. ESTIMACIÓN PRODUCCIÓN DE ENERGÍA.	58
TABLA 2-10. COSTOS DE AEROGENERADOR.	60
TABLA 2-11. VALOR CONSUMO DE LA FINCA EL PUENTE.	60
TABLA 2-12. ANÁLISIS FINANCIERO DEL PROYECTO.	61

Lista de ecuaciones

	PÁG.
ECUACIÓN 2-1. ECUACIÓN FUNCIÓN PROBABILIDAD DEL VIENTO.	38
ECUACIÓN 2-2. RELACIÓN VELOCIDAD MEDIA Y FACTOR DE ESCALA	39
ECUACIÓN 2-3. FRECUENCIA ACUMULADA DE LAS VELOCIDADES $> 0 =$ QUE UN VALOR DE V	39
ECUACIÓN 2-4. FRECUENCIA ACUMULADA PARA VELOCIDADES $< 0 =$ QUE UN VALOR DE V	39
ECUACIÓN 2-5. VELOCIDAD MEDIA ANUAL (A), LA MEDIANA (B), LA VARIANZA(C).	39
ECUACIÓN 2-6. VALOR MEDIO DEL CUBO DE LAS VELOCIDADES DEL VIENTO.	40
ECUACIÓN 2-7. VELOCIDAD EFICAZ.	41
ECUACIÓN 2-8. VELOCIDAD MEDIA ANUAL/PARÁMETRO C.	41
ECUACIÓN 2-9. DESVIACIÓN ESTÁNDAR/VELOCIDAD MEDIA ANUAL.	41
ECUACIÓN 2-10. FACTOR DE ENERGÍA O FACTOR DE POTENCIA EÓLICA (F_E).	41
ECUACIÓN 2-11. AJUSTE POR MÍNIMOS CUADRADOS.	42
ECUACIÓN 2-12. FACTOR DE ESCALA.	43
ECUACIÓN 2-13. VALOR COEFICIENTE A DE LA RECTA.	43
ECUACIÓN 2-14. VALOR COEFICIENTE B DE LA RECTA.	43
ECUACIÓN 2-15. ENERGÍA CINÉTICA.	46
ECUACIÓN 2-16. CAUDAL MÁSSICO.	47
ECUACIÓN 2-17. POTENCIA DISPONIBLE.	47
ECUACIÓN 2-18. DENSIDAD DE POTENCIA POR UNIDAD DE ÁREA.	47
ECUACIÓN 2-19. DENSIDAD DEL AIRE	47
ECUACIÓN 2-20. POTENCIAL EÓLICO DISPONIBLE EN FUNCIÓN DE LA V_M CÚBICA Y DE LA V_M	48
ECUACIÓN 2-21. POTENCIA MÁXIMA.	54
ECUACIÓN 2-22. EXERGÍA DE UN PROCESO DE FLUJO.	55
ECUACIÓN 2-23. EXERGÍA EÓLICA.	56
ECUACIÓN 2-24 EXERGÍA DE LA ENERGÍA CINÉTICA.	56
ECUACIÓN 2-25. RELACIÓN DE CONSUMO VS PRODUCCIÓN DE POTENCIA DEL AEROGENERADOR.	58

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Área	m ²	$A = \pi r^2$
$P(v)$	Probabilidad del viento		$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$
V	Velocidad del viento	m/s	s/t
C	Factor de escala	m/s	$c = e^{-\left(\frac{B}{k}\right)}$
K	Factor de forma	1	Ecu. 13.
F'	Frecuencia Acumulada de las Velocidades		Ec. 4
\tilde{v}	Velocidad media anual	m/s	Ec.5.a.
V^*	Velocidad eficaz		$V^* = \langle v^3 \rangle^{1/3}$
f_i	Frecuencia relativa		$f_i = n_i/N$
P_{max}	Potencial maximo	W	$P_{max} = C_p * P_d$

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
α	Parámetro de dispersión	uni	$\alpha = \sqrt{\sum_{i=1}^k f_i(v_i - \langle v \rangle)^2}$
β	Valor coeficiente B de la recta	Uni	ec. 14
Γ	Distribución gamma	1	$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-z} z^{x-1} dz$
\dot{m}	Caudal másico	Kg/s	$\dot{m} = pAV$
Δx	Exergía eólica	W	$\Delta x = \dot{m} \left(-v_1^2/2 \right)$

Subíndices

Subíndice	Término
C_p	Coeficiente de potencia
max	Maximo
MW	Mega watts

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>UPME</i>	Unidad de planeación minero energética
<i>CREG</i>	Comisión de regulación de energía y gas
<i>PEEA</i>	Producción de energía estimada anual
<i>PNUMA</i>	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
<i>ANLA</i>	Autoridad nacional de licencia ambiental
<i>GEI</i>	Gases efecto invernadero
<i>IDEAM</i>	Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales
<i>PPM</i>	Partes por millón de partículas
<i>VPN</i>	Valor presente neto
<i>TIR</i>	Tasa de Interés de Retorno
<i>IR</i>	Índice de Rentabilidad
<i>ECD</i>	Consumo energético diario
<i>H</i>	Hora

Introducción

Actualmente, debido a los nuevos estilos de vida de las personas, la demanda de electricidad en las zonas rurales está aumentando. En Colombia, el crecimiento poblacional continuo, ha llevado que la industria agrícola mejore las condiciones, modernizando los procesos de producción para dar cumplimiento a la demanda poblacional, todo esto ocasiona que se incremente el uso de electricidad. Pero, debido que las instalaciones eléctricas de la red comercial en su mayoría han cumplido su vida útil, ocasiona que haya cortes continuos, mala calidad del flujo eléctrico y en gran medida no llegue este servicio a los lugares más alejados. Todo esto conlleva el atraso y pérdidas en el proceso de modernización del campo colombiano (Gómez Páez, 2015).

La canasta energética está compuesta principalmente por energía hidroeléctrica, con un 69,18%, siendo esta dependiente del cambio climatológico como el fenómeno de El Niño y La Niña, en cuanto a su capacidad efectiva instalada de generación es de 12.258,4 MW, (UPME, 2018), lo que la posesiona como la principal fuente de generación eléctrica en el país, pero esto ha implica gran daño de trasfondo ambientales y sociales, graves que están en proceso de evaluación, (Fog, 2018).

Aprovechar fuentes de energías naturales, es la opción más viable que se está llevando a cabo en la mayoría de los países desarrollados, debido a que son energías alternativas, sostenibles e inagotables, su costo de instalación y mantenimiento son otro punto a favor que tienen este tipo de energías. Además, debido al apoyo e incentivos que está brindando la nación por medio de la ley 1715 de 2014 propuesta por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), en Colombia se ha aumentado este tipo de energías, obteniendo actualmente una capacidad efectiva instalada del 0,16%, representado en energía solar y eólica, las cuales tienen un potencial inmenso debido a la ubicación geográfica del país.

Utilizando la energía eólica, la más favorable para este proyecto, se obtiene de forma mecánica y por tanto se utiliza de forma directa, debido a su rendimiento, es muy superior

al de aparatos térmicos, económicamente compite con otras fuentes de energías tradicionales, emite cero monóxidos y bióxidos a la capa de ozono, fuente de energía disponible las 24 horas del día por millares de años y la solución más razonable para viviendas aisladas o que tengan el servicio de la energía tradicional, el cual debido que las líneas de traslado son muy viejas y faltas de mantenimiento en esta zona, ocasionan interrupciones constantes, variaciones notables en el voltaje y los altos costos en las tarifas del servicio eléctrico que posicionan al departamento del Tolima en segunda posición con mayor tarifa en el país, según boletín tarifario de la Superservicios de Colombia.

Luego de evaluar todos estos elementos el autor de este trabajo de investigación declara como problema de investigación: Las constantes interrupciones, variaciones en el voltaje y altos costos en el servicio de la energía eléctrica, provocan serias afectaciones en la cadena de producción ganadera, en los cultivos agrícolas y en la vida social en general en el sector del Alpujarra, constituyendo el problema de la investigación.

Con la aplicación de un sistema de generación de energía Eólica, la finca El Puente y sus habitantes se verán beneficiados, viendo mejorar su producción, ganadera, agrícola, estilo de vida, y de una u otra forma con el crecimiento de su económico. Para saber si el proyecto es factible, primero se debe estudiar el lugar de instalación del aerogenerador, que requiere medición atmosférica con la ayuda de un anemómetro, y luego se tabulan los datos para calcular la velocidad y otros factores que inciden en la velocidad del viento.

Objetivo general

Realizar un estudio de factibilidad técnico y económico para la implementación de un sistema de energía eólica en la finca el puente en el Municipio de Alpujarra Tolima

Objetivos Específicos

- Estimar la huella de carbono de la generación de energía hidroeléctrica frente a la energía eólica.

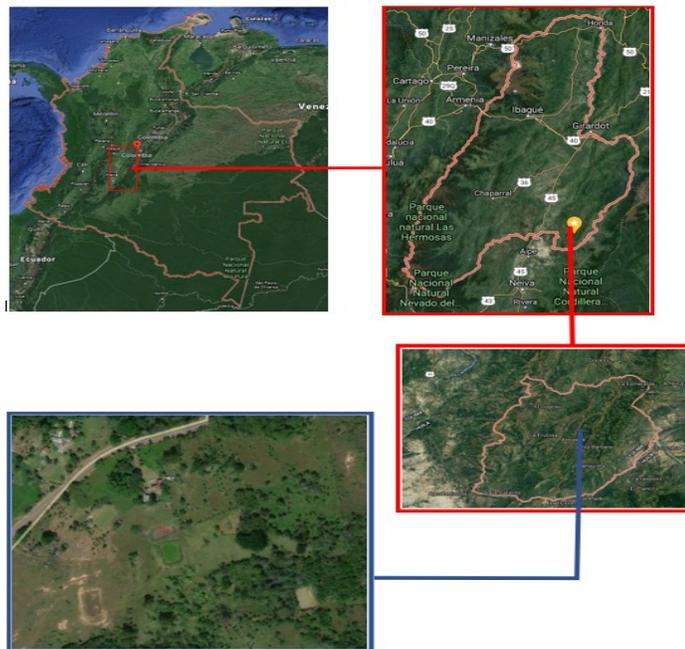
- Realizar el estudio del viento en la finca el puente para contemplar la posible potencia nominal del sistema eólico.
- Determinar el lugar idóneo para instalación del aerogenerador en la finca el puente.
- Proponer una alternativa generadora eólicas que cumpla las condiciones técnicas para suplir el consumo energético de la finca el puente en el municipio de Alpujarra Tolima.

Para llevar a cabo esta investigación se utiliza la siguiente metodología seccionada en 5 fases donde se explica el paso a paso de la elaboración de este trabajo.

Metodología

La localización del proyecto, es la finca El Puente, vereda Las Cruces, Municipio de Alpujarra, Departamento del Tolima; Colombia, precisamente en las coordenadas $3^{\circ} 25' 30''$ N y $74^{\circ} 55' 10''$ W, que fueron tomadas del mapa interactivo de Google Earth. El Municipio de Alpujarra se encuentra a 80 km de distancia de la ciudad de Neiva Huila, vía al norte y a 173 km de Ibagué Tolima, municipio ubicado en a una altura sobre el nivel del mar de 10360 msnm.

Figura 1-1. Ubicación de la finca El Puente municipio de Alpujarra Tolima.



Fuente: (satellites.pro , 2020)

El desarrollo del proyecto se realiza en la finca El Puente teniendo en cuenta que busca convertirse en un lugar autosustentable, que requiere un consumo ininterrumpido y de bajo costo de energía para el desarrollo de sus actividades. Las fases del proyecto se describen a continuación:

Fase 1:

Se realizará una investigación documental y de casos de éxito en implementación de sistemas eólicos en Colombia, con el objetivo de tener estadísticas, documentos soportes, y un marco conceptual y estado del arte lo suficientemente amplio para poder desarrollar el proyecto.

Fase 2:

Se realizará un estudio de cargas eléctricas de la finca con el propósito de tener el consumo de carga total a abastecer con el sistema de energía eólica. Realizar trabajos de campo para recopilar toda la información necesaria sobre el consumo total de la finca. Así mismo, se considera el área donde se determina inicialmente la ubicación de implementación del aerogenerador.

Fase 3:

Con la herramienta de medición de velocidad del viento (Anemómetro) se tomarán mediciones en distintas ubicaciones y a distintas alturas en la finca, con el propósito de determinar el sitio óptimo de instalación del sistema eólico.

Fase 4

Los datos recolectados se utilizan para determinar las velocidades de arranque, nominales y máximas del viento; y así obtener parámetros de clasificación del aerogenerador, se determina mediante fórmulas las cuales están desarrolladas en el presente documento.

Fase 5:

Se realizará la consolidación de toda la información obtenida de las fases anteriores para proceder con el análisis y elaboración de los documentos entregables, para posteriormente poder determinar la factibilidad del proyecto.

El aporte de este trabajo es que se realiza un estudio de factibilidad en la implementación de un sistema de generación de energía eólica en la Finca El Puente municipio de Alpujarra Tolima.

Justificación

Realizando el Estudio De Factibilidad, se podrá analizar y evaluar la favorabilidad que la finca El Puente pueda ahorrar energía, dinero y tiempo, además de ser la primera finca en el municipio de Alpujarra Tolima en tener un sistema autosuficiente que pueda suplir todas la necesidades de consumo eléctrico para mejorar el funcionamiento de la misma, aportando ejemplo a los demás vecinos veredales y municipales en ser precursora en esta zona en cuidar el medio ambiente con un sistema de generación autosuficiente.

En la región donde esta ubicada la finca, todo el año hace vientos constantes y rápidos que pueden alcanzar 24 – 27 m/s y promedio anual entre 4-5 m/s (IDEAM - UPME, 2017) que impulsan el movimiento mecánico de un aerogenerador en producir la electricidad suficiente para poder suplir el consumo de la finca El Puente y cualquier otra finca. Teniendo en cuenta estos registros se tiene un potencial grande de adquirir la energía eólica como una fuente limpia de obtener energía eléctrica, y así proteger el medio ambiente, además que cambiaría vida socio-económica de sus habitantes, dar solución a las múltiples interrupciones y variaciones del servicio eléctrico, que ocasionan daños a equipos eléctricos que pueda haber en una residencia.

Realizando el estudio de factibilidad en la finca el puente se pretende contribuir a fortalecer la autonomía y sostenibilidad, con el mejor funcionamiento y al desarrollo de la comunidad del municipio de Alpujarra en general, proponiendo la energía eólica como oportunidad para mejorar la sustentabilidad de una finca mejorando la producción de sus productos con costos más bajos y sin retrasos.

Alcance

Realizar una investigación y análisis del comportamiento del viento que inciden en el funcionamiento del sistema de energía eólica, determinando la factibilidad de implementación y así escoger el lugar adecuado para la instalación del sistema eólico.

Calcular los consumos eléctricos de la finca, analizando su funcionamiento para luego determinar el sistema eólico a implementar de pendiendo de sus características.

1. Estado del arte y marco teórico

En este capítulo se estudiará los antecedentes de la eólica, las incidencias que tiene la energía hidráulica frente a la eólica en las emisiones de gases que causan contaminación a la atmósfera y causantes del efecto invernadero, que se pueden medir mediante la huella de carbono que estas dejan, se hará una inducción a todo lo relacionado al viento y como se registra en Colombia y en la zona de estudio de este trabajo, además de estudiar los aerogeneradores, característica y tipos. Con esto tendremos una idea clara de lo que se tratara este trabajo.

1.1 Antecedentes

Desde la antigüedad, el interés mundial por la energía ha sido muy importante para mejorar la calidad de vida de las personas. Desde entonces, se ha estado tratando de actualizar y utilizar continuamente nuevas tecnologías que puedan brindar al planeta seguridad social, económica y cuidado ambiental.

La Madera es una de las primeras fuentes de energía utilizadas por la humanidad. Hasta la era de la revolución industrial, además del trabajo duro, los humanos también usaban caballos y otros animales para generar energía. Posteriormente, el uso de sistemas mecánicos como agua o molinos de viento para hacer que el rendimiento sea mayor, aunque su eficiencia aún no es tan buena como la tecnología actual.

Luego paso al uso del carbón en las máquinas de vapor hasta el siglo XIX, estas innovaciones llegaron hasta el uso de recursos fósiles (el petróleo y sus derivados), pero este recurso no es renovable, ya que tarda muchos años para su formación. La creciente industria marcó el comienzo del monopolio del petróleo y, por lo tanto, la sobreexplotación de la tierra con fines macroeconómicos.

Sin embargo, el crecimiento acelerado de la economía mundial en el siglo XX se basó en recursos no renovables. Este hecho ha provocado que el movimiento actual se denomine conciencia medioambiental. Comenzó en 1972 en la primera Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente celebrada en Estocolmo, Suecia. En la mencionada reunión se aprobaron la "Declaración de Estocolmo" y el programa de acción compuesto por 109 propuestas de cooperación ambiental internacional, allí se creó (PNUMA), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, (Bello, 1997).

Debido a la mención anterior en Colombia se han preocupado para adaptarse a esta declaración, por ello, se han registrado 1648 proyectos para generación de energía eléctrica, donde se evidencia que la tendencia de energías alternativas se ha incrementado los últimos 4 años, podemos observar que se han presentado 883 proyectos sobre energía solar, en tanto, solo 44 proyectos se han presentado sobre energía eólica, datos tomados en la tabla 1-1, lo que nos indica que no muchas personas e instituciones, tienen en cuenta este recurso.

Tabla 1-1. Proyectos de generación de electricidad según fuente de energía.

Año	Biomasa	Eólico	Geotérmico	Hidráulico	Otros	Solar	Térmico	Total
2007				4			2	6
2008				9			21	30
2009	1			14				15
2010				20			1	21
2011	1			33			18	52
2012		1		76				77
2013	1			27			3	31
2014	2			73		1	2	78
2015		4	1	46			8	59
2016	8	1		48		110	5	172
2017	6	3		48	1	222	2	282
2018	9	8		74		240	30	361
2019	4	20		66		236	28	354
2020	1	7		25		74	3	110
Total	33	44	1	563	1	883	123	1648

Fuente: (UPME E. L., 2020)

En la actualidad, hay 337 proyectos vigentes y en funcionamiento, y que tan solo 15 proyectos de energía eólica están bajo esta condición, pero ninguno se ha presentado en el departamento del Tolima.

Tabla 1-2. Número de proyectos vigentes por departamento.

Departamento	Biomasa	Eólico	Hidráulico	Solar	Térmico	Total
Valle			2	31	1	34
Antioquia			25	8		33
Boyacá		3	4	15		22
Risaralda			16	4		20
Tolima	2		5	13		20
Atlántico		2		16		18
Santander	1			17		18
Caldas			10	7		17
Bolívar		1		15		16
La Guajira		9		6		15
Cauca			8	5		13
Cesar				13		13
Córdoba				12		12
Cundinamarca			1	11		12
Norte de Santander			3	9		12
Magdalena				5	5	10
Meta				10		10
Sucre				9		9
Huila				7		7
Quindío			7			7
Bogotá DC				5		5
Casanare	1			3		4
Caquetá			1	1		2
Nariño			2			2
Putumayo				2		2
Vaupés				2		2
Arauca			1			1
Choco			1			1
Total	4	15	86	226	6	337

Fuente: (UPME E. L., 2020).

En el departamento de la Guajira se desarrolla el parque eólico Jepírachi, el más grande de Colombia, siendo este el proyecto más grande en generación de este tipo, entró en

operación en el 2004 generando 19,5 MW de potencia eólica, con 15 aerogeneradores de 1,3 MW cada uno, sometidos a una velocidad del viento de 9,8 m/s (Epm, 2020). Según comunicado dado por el ANLA (Autoridad Nacional de Licencia Ambiental) con este proyecto en el territorio colombiano se pretende reducir aproximadamente 330 toneladas de Co₂ al año.

A continuación, se presenta un resumen de algunos proyectos realizados en Colombia sobre Energía Eólica, donde se recopila las diferentes características.

Tabla 1-3. Proyectos eólicos en Colombia.

Proyecto	Propietario	Capacidad MW	Ubicación	Fase	Fin provisto
Andrea Jusayu	Desarrollos Eólicos Uribia	378	Uribia, La Guajira	estudios de viabilidad	2023
Guajira II	Isagén	325	Macao, La Guajira	prefactibilidad, estudios técnicos.	2022
Alpha	Vientos del Norte	212	Maicao, La Guajira	estudios de viabilidad	2022
EO200i	Empresas Públicas de Medellín (epm)	201	Uribia, La Guajira	estudios de viabilidad	2023
San Martín Energy Green	San Martin Energy Green	200	Piojo, Atlántico	estudios de viabilidad	2022
Carrizal	Jemeiwaa Kai	195	Uribia, La Guajira	estudios de viabilidad	2023
Casa Eléctrica	Jemeiwaa Kai	180	Uribia, La Guajira	estudios de viabilidad	2023

Fuente: (Bnamericas, 2020)

Las energías renovables provienen de recursos naturales que hipotéticamente son infinitos y pueden regenerarse. Estos provienen directa o indirectamente de la energía solar (Schallenberg, 2008, p. 46). Existen varias fuentes de energía que se regeneran de forma natural y sus energías relacionadas son:

Tabla 1-4. Fuentes de energía renovables.

FUENTES DE ENERGIA	PROCEDENCIA
Solar (térmica)	Calor del sol
Solar (luminosa)	Luz del sol
Eólica	Fuerza del viento
Hidraulica	Corrientes de agua
Mareomotriz	Mares y oceanos
Geotermica	Calor del interior de la tierra
Undimotriz	Olas del mar y de los oceanos

Fuente: (Wikimedia, 2020)

La mejor forma de utilizar energías renovables es generar electricidad y debido al mayor costo y la falta de recursos energéticos fósiles, es la mejor y más rentable alternativa en la actualidad. En Colombia, la energía hidroeléctrica es la fuente de energía más común, ya que hay 9 centrales de esta fuente, en total esta generación en el país está representada el 69,18% de la producción neta.

A nivel mundial, la producción de energía renovable es del 27% (Anuario Estadístico Mundial De Energía 2020), pero está creciendo rápidamente ya que el problema medioambiental ha creado conciencia en la mayoría de los países que quieren desarrollar y utilizar energía limpia y sostenibles que sea rentable y accesible.

1.2 Emisiones atmosféricas y el efecto invernadero.

El efecto invernadero es un proceso natural que puede mantener la energía del sol, igualmente así la temperatura global. Este proceso natural se agrava cuando el contenido de dióxido de carbono en la atmósfera aumenta debido al uso excesivo de combustible o la deforestación, por lo que el 70% de la energía solar que ingresa a la atmósfera y generalmente sale de la atmósfera en el espacio ahora es ozono troposférico (Henry Oswaldo Benavides Ballesteros, 2007). Una capa más gruesa de gas retiene la radiación infrarroja y se calienta globalmente, produciendo efectos irreversibles, como sequías, olas de calor, incendios forestales, inundaciones y tormentas, para la vida humana. Actualmente, la concentración de gases de efecto invernadero se encuentra entre 280 y 360 partes por millón de partículas (PPM) (Oceana, 2019).

1.2.1 El metano (CH₄)

Es un gas de efecto invernadero muy potente, se produce en vertederos o reservorios (descomposición anaeróbica), los desechos orgánicos animales, los gases de efecto invernadero producidos por la ganadería representan el 20% del total de las emisiones globales y el uso de combustibles fósiles. La concentración de metano en la atmósfera es de 1,774 partes por trillón (ppm), que es un 59% más alta que la concentración de metano antes de la revolución industrial. Sin embargo, hay 220 veces menos metano en la atmósfera que dióxido de carbono.

El hidrato de metano es una mezcla congelada de metano y agua, que se encuentra en grandes cantidades en el mar. Es probable que el cambio climático continúe liberando reservas de metano congeladas y, de repente, agregue demasiado metano a la atmósfera, lo que agravará el impacto de los gases de efecto invernadero y provocará un calentamiento global sin precedentes, (Henry Oswaldo Benavides Ballesteros, 2007).

1.2.2 Óxido nitroso (N₂O)

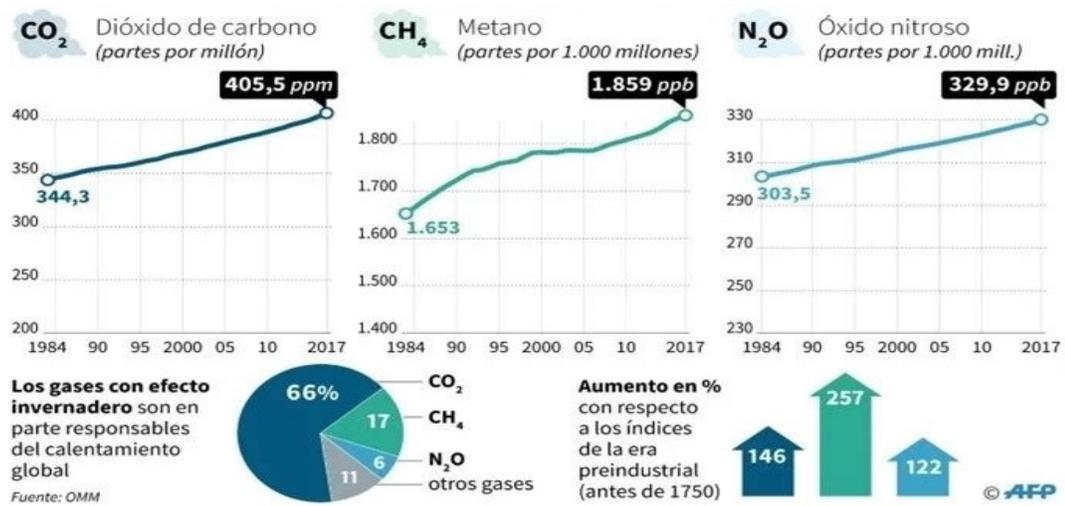
Es emitido por bacterias del suelo. La agricultura y el uso de fertilizantes a base de nitrógeno y el tratamiento de desechos animales aumentan la producción de óxidos nitrosos. Algunas industrias, como el nailon y la combustión de combustible en motores de combustión interna, también liberan óxido nitroso a la atmósfera. En un siglo, el óxido nitroso provocará un calentamiento global unas 300 veces mayor que el dióxido de carbono. Sin embargo, al igual que el metano, el óxido nitroso se encuentra en concentraciones mucho más bajas que el dióxido de carbono, que actualmente es 319 ppm y un 18% más alto que antes de la revolución industrial, (Henry Oswaldo Benavides Ballesteros, 2007).

1.2.3 Partículas en suspensión (humo negro)

No son un verdadero gas de efecto invernadero, por su composición sólida y calientan la atmósfera de diferente manera que un gas, se estima que el humo negro podría ser el responsable del 25% del calentamiento global. Está formado por partículas microscópicas originadas por la combustión incompleta de la materia orgánica, especialmente de combustibles fósiles. Debido a que puede acelerar el derretimiento de la nieve y el hielo, el humo negro desempeña un papel muy destacado en el cambio climático del Ártico. De

hecho, podría ser el responsable de más del 90% del calentamiento de esa zona. El control y la reducción de las emisiones de humo negro son particularmente importantes, sobre todo, debido al calentamiento que ha sufrido el Ártico, a un ritmo que dobla el que ha afectado al resto del mundo en los últimos 100 años (Oceana, 2019).

Figura 1-1 Concentración de gases efecto invernadero.



Fuente: (Oceana, 2019).

Esta emisión se distribuye de la siguiente forma en el ranking mundial de contaminantes de CO₂, publicado por el (Atlas Mundial de Carbono, 2018), con datos condensados hasta el 2018.

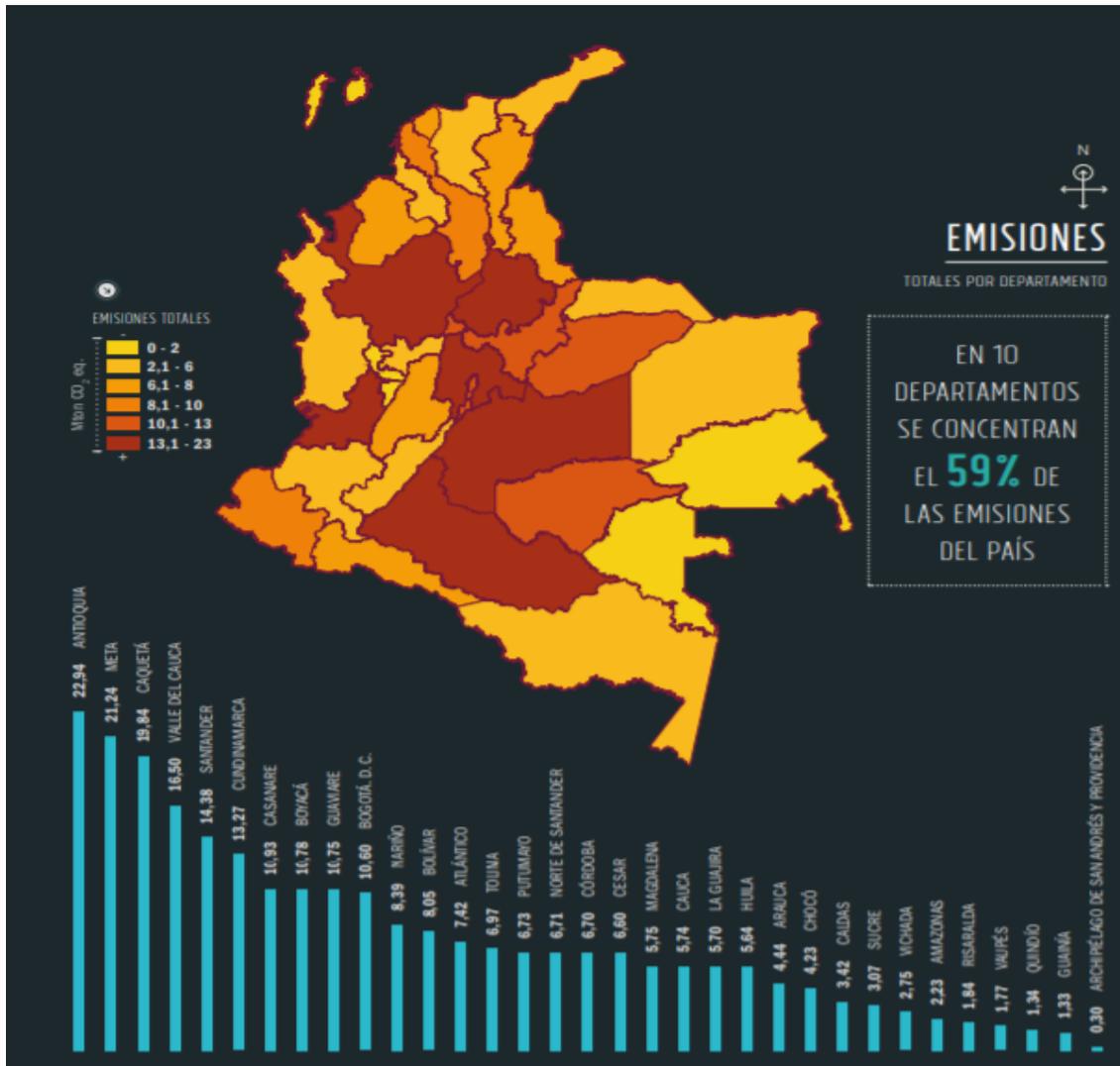
Figura 1-2 Emisiones de CO2 en países.

Territorial (MtCO ₂)		MtCO ₂
Rango	País	
1	China	10065
2	Estados Unidos de	5416
3	India	2654
4	Federación de	1711
5	Japón	1162
6	Alemania	759
7	Irán	720
8	Corea del	659
9	Arabia	621
10	Indonesia	615
11	Canadá	568
12	México	477
13	África del	468
14	Brasil	457
15	Turkía	428
16	Australia	420
17	Reino	379
18	Polonia	344
19	Italia	338
20	Francia	338

Fuente: (Gilfillan et al, 2019)

Colombia se encuentra en el puesto 42 con 97 MtCO₂ según gráfica de emisiones de CO₂ por países. Según datos proporcionados por el IDEAM en el tercer comunicado a las Naciones Unidas en la comisión del cambio climático, el departamento de Antioquia lidera las emisiones de CO₂ con 22,94 Mton equivalentes.

Figura 1-3 Emisiones de CO₂ por departamentos de Colombia.



Fuentes: (IDEAM, 2017)

1.3 La energía eólica como alternativa renovable y sostenible.

La energía eólica sigue siendo la tecnología más eficiente para producir energía de forma segura y ambientalmente sostenible: sin emisiones, autóctona, inagotable, competitiva y creadora de riqueza y empleo, (ACCIONA, 2020).

1.3.1 El viento

El viento es el movimiento del aire desde un área de alta presión a un área de baja presión. De hecho, el viento existe porque el sol calienta la superficie de la tierra de manera desigual. A medida que sube el aire caliente, el aire más frío entra para llenar el vacío. Mientras el sol brille, el viento soplará, y mientras el viento sople, la gente lo usará para mejorar sus vidas; (GEOGRAPHIC, 2010).

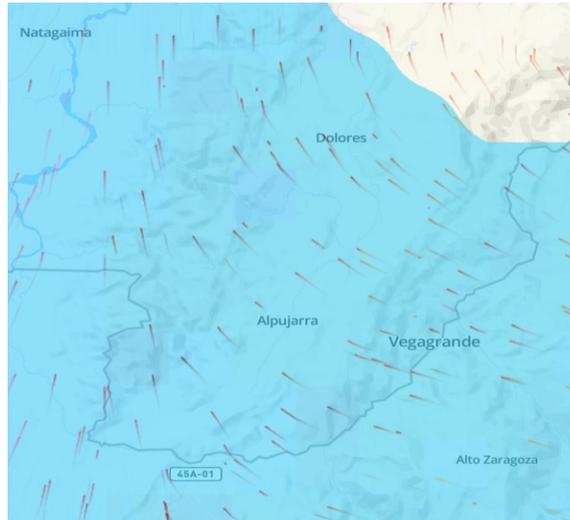
Figura 1-4. Mapa de corrientes de viento en Colombia.



Fuente: (IDEAM - UPME, 2017)

Para el proyecto se mostrará la incidencia del viento en una muestra tomada en tiempo real.

Figura 1-5. Corrientes de viento en Alpujarra Tolima.



Fuente: (Channel, 2020)

1.3.2 Energía eólica

La energía eólica es una fuente de energía renovable a partir de la energía cinética del viento que mueve las palas de un aerogenerador, que a su vez pone en marcha una turbina que la convierte en energía eléctrica (López, 2004).

Figura 1-6. Aerogenerador.



Fuente: (ACCIONA, 2020)

Si hablamos del crecimiento de las energías renovables en los últimos años, entonces la energía eólica es la fuente de energía más creciente y aceptada en el mundo. Según el Consejo Global de Energía Eólica (GWEC), la capacidad instalada global de energía eólica aumentó un 10% en 2019 a 651 GW.

Los siguientes factores han contribuido al aumento de las energías renovables (energía eólica) durante la última década:

- Fuentes de viento inagotables existentes en todo el planeta.
- Continuo agotamiento de combustibles fósiles.
- Avances tecnológicos.
- Facilidad de aceptación de proyectos que ayuden al cuidado del medio ambiente por parte de los gobiernos de los diferentes países.

1.3.3 Aplicación de la energía eólica.

La energía eólica proviene de la fuerza del viento, entre los usos más importantes en la antigüedad se encuentran los siguientes:

- Navegación marítima.
- Molinos de viento para la molienda de granos.
- Molinos de viento para la extracción de agua.
- Molinos eólicos para producir electricidad.

Actualmente, la principal aplicación de la energía eólica es la generación de electricidad.

La energía contenida en el viento se convierte en energía mecánica mediante máquinas llamadas turbinas eólicas o turbinas eólicas (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2019).

1.3.4 Ventajas y desventajas de la energía eólica

Entre las ventajas y desventajas de la energía eólica, hay que destacar que una de las ventajas más notables de su uso; fuente de energía renovable, ecológica, autóctona e inagotable. Además, esto significa una reducción en el uso de combustibles fósiles y, por lo tanto, contribuye al desarrollo sostenible. Debemos señalar que uno de los mayores inconvenientes de su uso es la planificación de la generación de energía debido a la aleatoriedad del viento. Se puede observar las principales ventajas y desventajas en la siguiente tabla:

Tabla 1-5. Ventajas y desventajas de la Energía Eólica

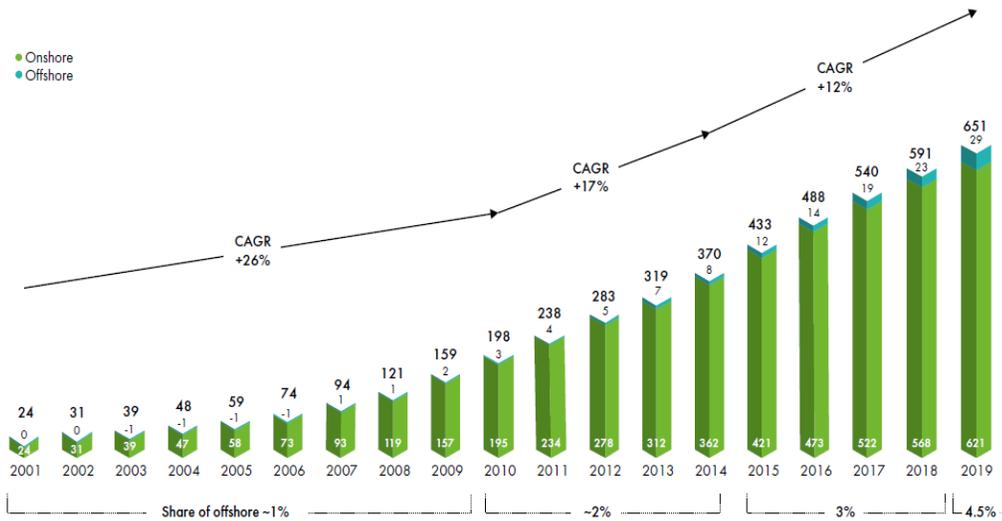
Ventajas	Desventajas
La energía base a utilizar es el viento por tal motivo es gratuita y renovable.	Su producción de electricidad no es continua. Está sujeta disponibilidad del viento.
El proceso de generación de energía no produce contaminación ambiental ni efecto invernadero.	Se trata de una energía muy subvencionada.
La instalación de un parque eólico es muy rápida de montar (6 meses a 1 año).	Los parques eólicos tienen un ligero impacto ambiental (fauna y paisaje).
Aumenta la tasa de empleo de la población.	Para el acceso a los parques se necesitan abrir carreteras, que en algunos casos causan un impacto ambiental.
Aumenta la plusvalía en el sector beneficiado.	Genera ruido que puede ser molesto, si hay viviendas próximas en la zona.
El costo de inversión es relativamente alto, pero se equilibra con su bajo costo de operación y esto resulta una opción atractiva para los inversionistas.	Puede ser causa de la muerte de aves, especialmente de paso, ya que los parques se instalan en zonas con corrientes de aire que son las que aprovechan las aves migratorias.
Ahorra otras materias primas no renovables.	
Se promueve la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías.	

Fuente: Diferentes páginas de internet

1.3.5 Demanda de energía eólica

En los últimos 15 años, la energía eólica ha crecido significativamente en el mercado global de generación de energía eléctrica. Prueba la relevancia de este tipo de generación de energía, en la siguiente figura 1-7 podemos observar el aumento de la capacidad instalada acumulada de energía eólica en el mundo.

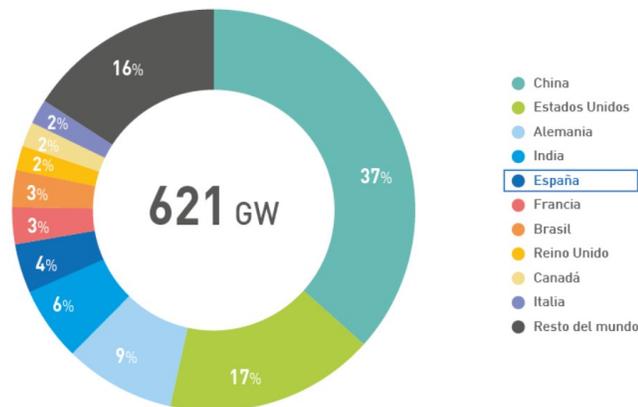
Figura 1-7 Histórico De Instalaciones Totales (En Tierra Y En Alta Mar) Energía Eólica.



Fuente: (GWEC, 2019).

Como se observa en la figura, la capacidad instalada en el año 2019 es total acumulado de 651 GW distribuidos en 621 GW de forma terrestre y 29 GW de alta. En tanto este crecimiento está dividido en países que cada vez aumentan los esfuerzos para utilizar esta clase de energía, en donde evidenciamos en la figura 1-8 que China lidera el crecimiento del ranking en el potencial eólico instalado, mientras Colombia está en el 16% del resto del mundo con una generación de 18,4 MW (EPME, 2018)

Figura 1-8 Ranking de países por potencia terrestre acumulada.



Fuente: (GWEC, 2019)

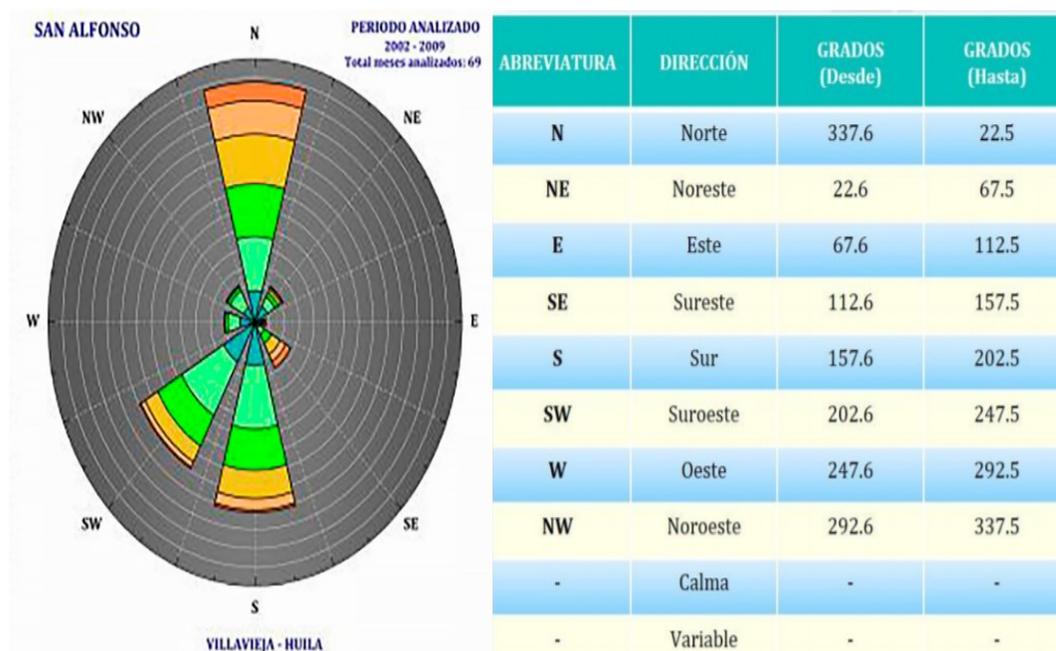
1.4 Conceptos de Energía Eólica

La información de este epígrafe es tomada de la teoría encontrada en el atlas del viento en Colombia, encontraremos datos obtenidos de dos estaciones meteorológicas (San Alfonso en Villavieja Huila y La Legiosa en Colombia Huila) cercanas a la ubicación de desarrollo de este trabajo.

1.4.1 Rosa de Vientos

Representar gráficamente las direcciones principales de diferentes velocidades del viento en una ubicación específica. Se obtiene calculando la frecuencia de ocurrencia observada a intervalos de dirección y velocidad determinados por estándares o investigadores. En la siguiente figura, se ha dividido 360 ° en 8 sectores:

Figura 1-9. Rosas de vientos, San Alfonso, Villavieja Huila.



Fuente: (IDEAM - UPME, 2017)

Estimación de la velocidad del viento, al no tener disponibilidad de instrumentos de medición, a lo cual, observando los efectos del viento sobre penachos de humo, vegetación, superficie del mar, etc. se puede determinar la Escala de Beaufort, (López, Energía Eólica, 2004).

Tabla 1-6. Escala de Beaufort.

Escala	Nombre	kt	m/s	km/h	mph	Características para la estimación de la velocidad en la Tierra
0	Calma	1	0-0.2	1	1	Calma, el humo se eleva verticalmente.
1	Ventolina	1-3	0.3-1.5	1-5	1-3	La dirección del viento se revela por el movimiento del humo, pero no por las veletas.
2	Brisa muy débil	4-6	1.6-3.3	6-11	4-7	El viento se percibe en el rostro; las hojas se agitan; la veleta se mueve.
3	Brisa débil	7-10	3.4-5.4	12-19	8-12	Hojas y ramitas agitadas constantemente; el viento despliega las banderolas.
4	Brisa moderada	11-16	5.5-7.9	20-28	13-18	El viento levanta polvo y hojitas de papel, ramitas agitadas.
5	Brisa fresca	17-21	8.0-10.7	29-38	19-24	Los arbustos con hoja se balancean; se forman olitas con cresta en las aguas interiores (estanques).
6	Viento fresco	22-27	10.8-13.8	39-49	25-31	Las grandes ramas se agitan; los hilos telegráficos silban; el uso del paraguas se hace difícil.
7	Viento fuerte	28-33	13.9-17.1	50-61	32-38	Los árboles enteros se agitan; la marcha en contra del viento es penosa.
8	Viento duro	34-40	17.2-20.7	62-74	39-46	El viento rompe las ramas; es imposible la marcha contra el viento.
9	Viento muy duro	41-47	20.8-24.4	75-88	47-54	El viento ocasiona ligeros daños en las viviendas (arranca cañerías, chimeneas, tejados).
10	Temporal	48-55	24.5-28.4	89-102	55-63	Raro en los continentes, árboles arrancados, importantes daños en las viviendas.
11	Borrasca	56-63	28.5-32.6	103-117	64-72	Observado muy raramente, acompañado de extensos destrozos.
12	Huracán	≥64	≥ 32.7	≥118	≥73	Estragos graves y extensos.

Fuente (IDEAM - UPME, 2017):.

1.4.2 Clasificación de los Vientos

Los vientos se clasifican en globales, estacionales, anticiclónicos, ciclónicos y locales.

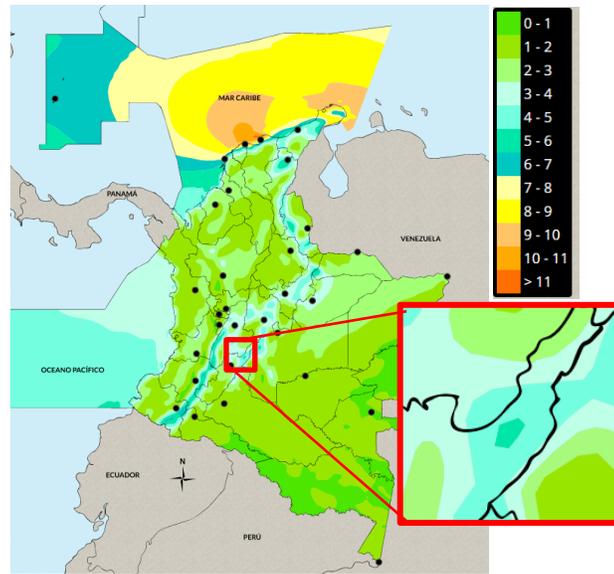
- **-Globales:** es un movimiento de aire general que determina las características climáticas de la tierra. En áreas cercanas a Ecuador, como Colombia, la dirección del viento aumenta porque son una zona de aire caliente, moviéndose hacia el sur y el norte. Colombia también se ve afectada por los vientos alisios, que ocurren en áreas de alta presión y cuando el aire está cayendo.
- **Estacionales:** Cuando la baja presión y la alta temperatura ocurren en tierra y ocurre lo contrario en el océano, se llama verano. Cuando los continentes muestran alta presión y baja temperatura y fuertes vientos soplan hacia el océano, se llama invierno.
- **Ciclónicos:** Áreas donde la presión es inferior a la normal
- **Anticiclónicos:** Áreas donde la presión es superior a la normal.

- **Locales:** Brisa marina y brisa terrestre. Durante el día, la tierra está más caliente que el mar. El aire caliente de la tierra sube y fluye hacia el mar, siendo reemplazado por el aire frío del mar. Estas corrientes de aire se llaman brisa marina. Lo contrario sucedió por la noche. Dado que la tierra es más fría que el océano, el aire frío desciende a la tierra y entra al océano. El aire caliente en el mar ahora se ha vuelto más frío y ha sido reemplazado por el aire caliente en tierra. Estas corrientes de aire se denominan brisa terrestre, (Escuela de Navegación Santa Pola, 2016)

1.4.3 Vientos que llegan a Colombia.

En el territorio Nacional se presenta comportamientos de los vientos, donde las velocidades durante el año vienen iguales o superiores a 5 m/s, alcanzando los 11 m/s, que se mantienen en el departamento de la Guajira, el resto del país muestra variaciones dentro del ciclo estacional. En donde las velocidades del viento que se dan con mayor frecuencia en el territorio nacional se evidencian en la figura 1-5, dando un promedio entre 3 m/s y 5 m/s, anual en el municipio de Alpujarra Tolima, según se evidencia en el zoom de la ilustración. Debido que Colombia está ubicado en zona tropical, hace que las condiciones climatológicas sean especiales, por tanto, podemos gozar con vientos que pueden llegar a 11 m/s o más.

Figura 1-10. Mapa vientos más probables en Colombia.



Fuente: (IDEAM - UPME, 2017)

Una vez entendidos los conceptos básicos del viento y sus efectos sobre la atmósfera y la superficie terrestre en el mundo, y particularmente en Colombia, Tolima y Alpujarra, es necesario comprender su potencial en la generación de energía eólica como fuente renovable e ilustrar beneficios para el medio ambiente.

1.5 Aerogeneradores.

Es un dispositivo que puede convertir la energía cinética del viento en energía mecánica, que eventualmente se convierte en energía eléctrica. Son una versión ampliada y mejorada de los antiguos molinos de viento que utilizaban energía mecánica para moler, hoy su energía eléctrica se utiliza para un sinnúmero de cosas, (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012).

Su clasificación está sujeta a diferentes criterios:

A. Según la dispersión del eje de giro.

Figura 1-11. Eje vertical Darrieus.



Figura 1-12. Eje vertical Savonius.



Figura 1-13. Eje vertical Giromill.



Figura 1-14. Eje horizontal.



Fuente: imágenes Motor de Búsqueda Google.

B. Según el número de palas.

Figura 1-15. Aerogenerador Monopala - Bipala.



Figura 1-16. Aerogenerador Tripala.



Figura 1-17. Aerogenerador Multipala.



Fuente: Imágenes Motor de Búsqueda Google.

C. Según la velocidad del rotor de la turbina eólica.

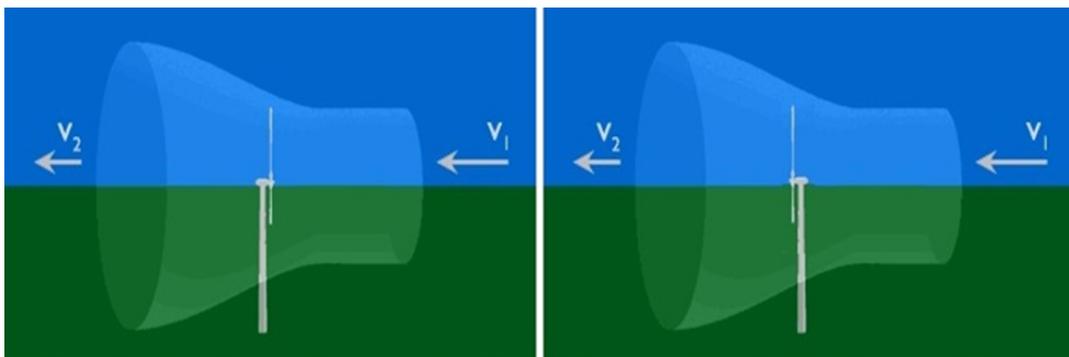
- **Velocidad Fija:** La velocidad del rotor permanece constante y se determina independientemente de la velocidad del viento por la frecuencia de la red, la relación de transmisión y el diseño del generador (Sáenz Robles, 2013).
- **Velocidad variable:** Están diseñados para lograr la máxima eficiencia aerodinámica en un amplio rango de velocidades del viento, lo que significa aumentar la potencia generada, eliminar las oscilaciones de potencia debidas a la variabilidad del viento, reducir el estrés mecánico del aerogenerador y aumentar la calidad de energía entregada (Sáenz Robles, 2013).

D. Según su control y regulación

- Control por pérdida aerodinámica (stall Control) o de palas de paso fijo, Tienen las palas del rotor unidas al buje en un ángulo fijo. Sin embargo, el perfil de la pala se diseñó aerodinámicamente para garantizar que cuando la velocidad del viento sea demasiado alta, surjan turbulencias en la parte del buje que no mira hacia el viento, como se muestra hace cinco diapositivas. Esta pérdida de sustentación evita que la fuerza de elevación de la pala actúe sobre el rotor, (Asociación danesa de la industria eólica, 2003).
- Control por pérdida activa aerodinámica (active stall control), aumenta el ángulo de paso de las palas para llevarlas hasta una posición de mayor pérdida de sustentación, y poder así consumir el exceso de energía del viento, (Asociación danesa de la industria eólica, 2003).
- Control por variación del ángulo del paso de pala (pitch control), el controlador electrónico de la turbina comprueba la potencia generada varias veces por segundo. Cuando el valor es demasiado alto, el controlador enviará un comando al mecanismo de cambio de tono, lo que inmediatamente hace que las palas del rotor se separen ligeramente del viento (desde la dirección del viento). Por el contrario, cuando el viento vuelva a disminuir, las aspas se girarán hacia el viento, (Asociación danesa de la industria eólica, 2003).

E. Según a la posición del equipo con referencia al viento.

Figura 1-18. Aerogeneradores tipo barlovento y sotavento.

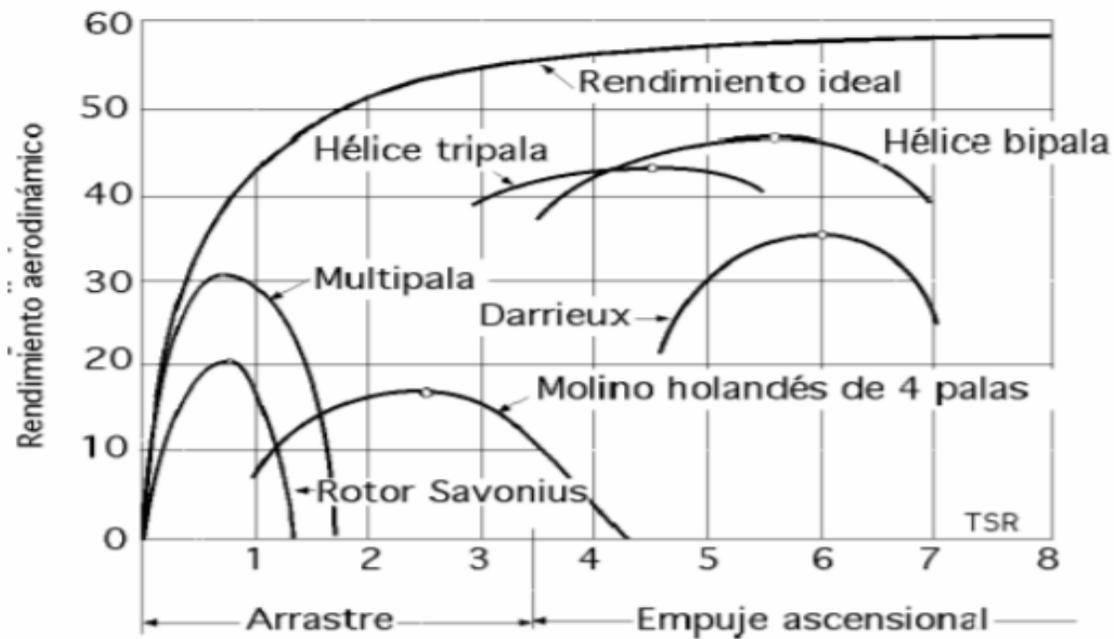


Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2019)

Los aerogeneradores más usados son de eje horizontal y principalmente tripala a barlovento, con sistema de control activa y torres tubulares. Regulación activa por paso variable (pitch). En los últimos años la tendencia es utilizar rotores de velocidad variable, con generadores asíncronos con rotor doblemente alimentados, también generadores síncronos multipolos para mayor beneficio de generación de electricidad

Como se puede ver en el diagrama de coeficiente de potencia Vs velocidad específica (figura 1-19), la comparación de rendimiento de varios tipos de aerogeneradores de eje vertical y eje horizontal. Se puede observar que el rendimiento del eje horizontal (bipala y tripala) es incluso superior a los demás, incluso mayor al multipala. Como se mencionó anteriormente, se puede ver que el rendimiento de las turbinas eólicas de eje vertical como el rotor savonius o el rotor darrieux es menor que el de las turbinas eólicas de eje horizontal.

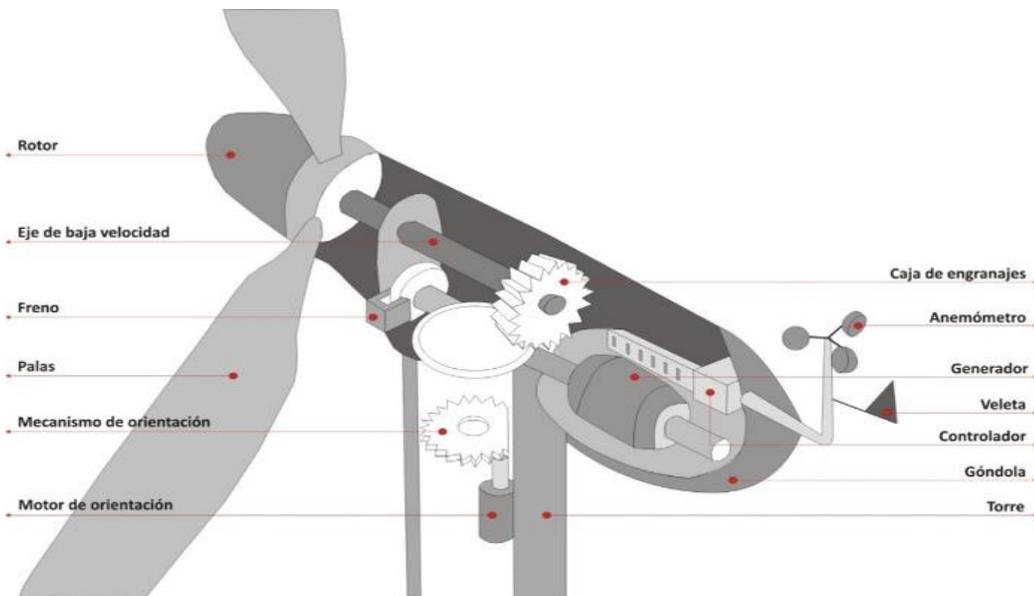
Figura 1-19 Rendimiento de tipos de aerogeneradores.



Fuente: (Hernandez, 2015).

1.6 Partes de un aerogenerador.

Figura 1-20. Partes de un Aerogenerador.



Rotor: Elemento principal de una máquina eólica. Transforma la energía cinética del viento en mecánica utilizable.

Tren de potencia o conversión mecánica: Compuesto por el eje de velocidad baja, la caja de cambios de velocidad, el eje de velocidad alta y las balineras o cojinetes que soportan los ejes.

Freno: Mecanismo que hace parar el sistema en momentos que alcanza velocidad de abatimiento (viento muy fuerte) o por orden directa de quien controla el sistema.

Palas: Elementos diseñados bajo criterios aerodinámicos que reciben directamente el viento y giran en el eje, produciendo energía rotacional.

Mecanismo y motor de orientación: Componente que detecta la dirección del viento para orientar el rotor en este sentido. Compuesto por cojinete, motor eléctrico, sensor y freno.

Caja de engranajes: Dependiendo del modelo de turbina, se utilizan. Transmite la potencia al interior de la turbina.

Anemómetro: Elemento que mide la velocidad del viento.

Generador: Es el Sistema eléctrico. Transforma la energía mecánica en eléctrica. También hace parte de este sistema, la conectividad a las demás aplicaciones.

Veleta: Evidencia la dirección de procedencia del viento predominante.

Controlador: Posee ordenadores que supervisan el funcionamiento interno de la turbina.

Góndola: Contenedor de los elementos mencionados anteriormente.

Torre: Para localizar una turbina eólica, esta se debe situar sobre una estructura de soporte cuya altura sea suficiente para soportar las cargas. A mayor altura, mayor velocidad de viento.

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2019)

1.7 Huella de carbono de la energía eólica.

La huella de carbono es una medida del impacto de todos los gases de efecto invernadero en el medio ambiente, provocados directa o indirectamente por nuestras actividades

(individual, colectiva, final y producto). Se refiere a la cantidad de gases de efecto invernadero, medidos en toneladas o kilogramos de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq), producidos por la quema de combustibles fósiles y otras formas de generación, utilizados para la producción de energía, calefacción y transporte (Heloísa Schneider, 2009).

Para dar una idea sobre la huella de carbono y el impacto al medio ambiente tomaremos como referencia cuatro tipos de aerogeneradores construidos por la empresa Siemens en la implementación de un parque eólico, dos marinos y dos terrestres.

- Parques eólicos terrestres:

5 gCO₂e/kWh, en el molino SWT-2.3-108.

4 gCO₂e /kWh, en el molino SWT-3.2-113.

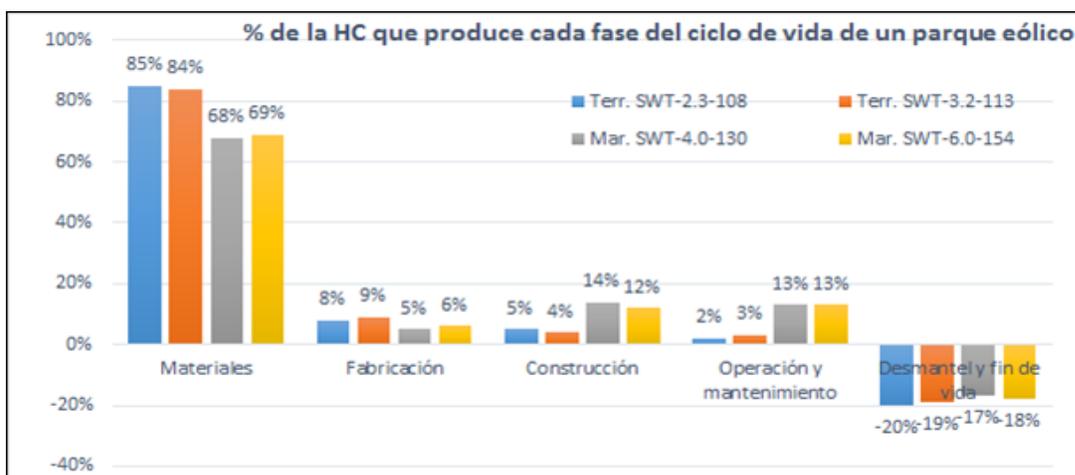
- Parques eólicos marinos:

10 gCO₂e /kWh, en el molino SWT-4.0-130.

7 gCO₂e /kWh, en el molino SWT-6.0-154.

En la figura 1-21 refleja el porcentaje CO₂ producido en las etapas de ciclo de vida de la elaboración de un parque eólico.

Figura 1-21 Huella de carbono en las fases del ciclo de vida de un parque eólico.



Fuente: (Cabañes, 2016)

Se puede ver que la etapa de materiales produce la mayor huella de carbono debido a su extracción o explotación, para fabricación de los aerogeneradores, esto indica que en valor absoluto esta etapa tiene una huella de Carbono de 3,36 y 4,25 gCO₂eq/kWh en los parques terrestres; y de 4,83 y 6,8 gCO₂eq/kWh en los parques marinos. También podemos observar que la cuarta etapa está en porcentaje negativo, debido a que toma la hipótesis que al final de la vida útil de estos aerogeneradores, estos se desmontan para ser reciclados, permitiendo la recuperación de materiales, evitando su extracción y la energía eléctrica producida en la incineración deja de ser producida por el correspondiente matriz energética, haciendo que todo estos componentes tengan una utilidad, Todo esto evita las emisiones de gases de efecto invernadero de las actividades iniciales y explica la huella de carbono negativa (Cabañes, 2016).

Como resultado del trabajo conjunto entre el Ministerio de Minas y Energía, la Unidad de Planeación Minero-Energética y XM en Colombia, el país cuenta con un valor unificado del factor de emisión de energía para inventarios de Gases de Efecto Invernadero (GEI), mencionado valor es 1164,38 gCO₂/KWh, esto fue calculado en el año 2019 con un total de generación energética de 71.879.581.392 KWh y un total de GEI de 11.815.408 tonCO₂. Esto permitirá que las empresas en Colombia puedan calcular la huella de carbono asociada al consumo de energía eléctrica, dicho factor lo veremos en la tabla (XM, 2020).

Ahora bien, para poder realizar un comparativo entre la generación de energía hidroeléctrica frente a la eólica en la medición de la huella de carbono, se toma con la media de las emisiones de las 400 plantas instaladas en el mundo de la empresa ENEL (2666 MW/h) y las 400 plantas de la empresa Vattenfall (2666 MW/h). Cabe resaltar que la eólica no genera metano (CH₄), (carbono, 2020).

Tabla 1-7. Emisión de gases Gei empresas Enel y Vattenfall.

Tipo energía	GEI	Etapa 2	Etapa 3	Pérdidas en red	Etapa 4	Total
Hidráulica	CO ₂	57,63	121,18	18,18	121,18	318,17
	CH ₄		141,3		141,3	282,6
Eólica	CO ₂	37.4	2.84	1,94	2,7	44,9

Fuente: (carbono, 2020).

En los datos dados en la tabla 1-7, la generación eólica tiene una diferencia de 273,27 gr de CO₂ y 282.6 gr de CH₄ por cada kW/h al cabo de un año, generado con comparación a la generación de energía hidroeléctrica, (Naranjo, 2012). Con esto se concluye que las hidroeléctricas son 13,4 más contaminantes que la energía eólica, así estas sean consideradas también como energía limpia, solo se cumpliría estas características si solo se realiza en minipresas para el abastecimiento de lugares pequeños.

2. Estudio y cálculo del aerogenerador

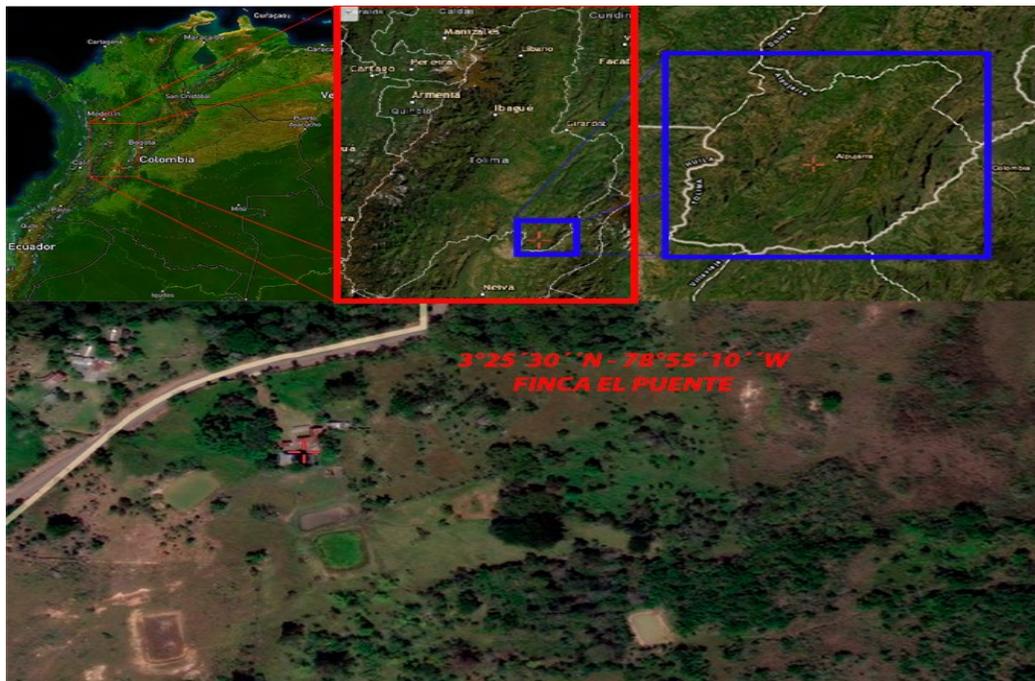
En este capítulo se realizara el estudio de factibilidad técnico, donde encontraremos las variables de las velocidades del viento dadas por equipo de medición eólico, en tres ubicaciones de la finca El Puente donde se tendrá en cuenta que no tenga obstáculos que determinen variaciones importante al momento de obtener los datos, esta estadística de las variables del viento serán calculadas mediante la distribución de Weibull, sistema más utilizado para el cálculos de potencial eólico de una zona, mediante software y la utilización de Excel Office, además se seleccionará la ubicación adecuada dentro de la finca para la instalación el aerogenerador que se adapte a las condiciones del estudio previo. Por último, calcularemos la factibilidad financiera mediante un análisis costos beneficios del trabajo una vez terminado los cálculos técnicos

2.1 Localización del proyecto

Este trabajo de grado se realiza en la Finca El Puente, vereda Las Cruces, Municipio de Alpujarra, Departamento del Tolima; Colombia.

La finca El Puente se ubica en las coordenadas $3^{\circ}25'30''N$ - $78^{\circ}55'10''W$ sobre el flanco occidental de la Cordillera Oriental (cuchilla de Altamizar), Colinda al norte con Dolores Tolima, Oriente Baraya y Colombia Huila, Occidente Natagaima Tolima y al sur con los municipios de Baraya y Villavieja Huila. Con una altura sobre el nivel del mar de 1.361 msnm.

Figura 2-1. Ubicación finca El Puente.



Fuente: (Satelites pro / Mapa de Colombia, 2020)

El estudio preliminar para la implementación de un aerogenerador es de crucial importancia para determinar la disponibilidad de los recursos renovables allí disponibles. El primer paso es determinar la cantidad de viento presente en el área. Para ello, se registran los datos de velocidades del viento de dos estaciones meteorológicas del IDEAM, La Legiosa en Colombia y San Alfonso en Villavieja todas en Huila. Estos datos serán comparados con mediciones realizadas localmente con un anemómetro.

2.2 Recolección de datos con anemómetro

Para utilizar el anemómetro para la medición, debe colocarse en un lugar abierto y no verse afectado por obstáculos cercanos, ya que estos obstáculos interferirán seriamente con la velocidad y dirección del viento

El anemómetro se instala en un mástil de tubo galvanizado y tiene un largo de 10 m sobre el nivel del suelo sujetado de tal manera que se mantenga fijo y no dé problemas al recolectar los datos, teniendo en cuenta que no se encuentre ninguna clase de obstáculos

que hagan varias las condiciones para la medición, esto es determinante para hallar la mejor ubicación como se muestra en la figura 2-2.

Figura 2-2. Instalación del anemómetro.



Fuente: Manuel A Díaz, 2020.

El anemómetro que se utilizó es digital de marca Lutron AM4206M, proporciona datos como son; medir las velocidades del viento y la temperatura del ambiente.

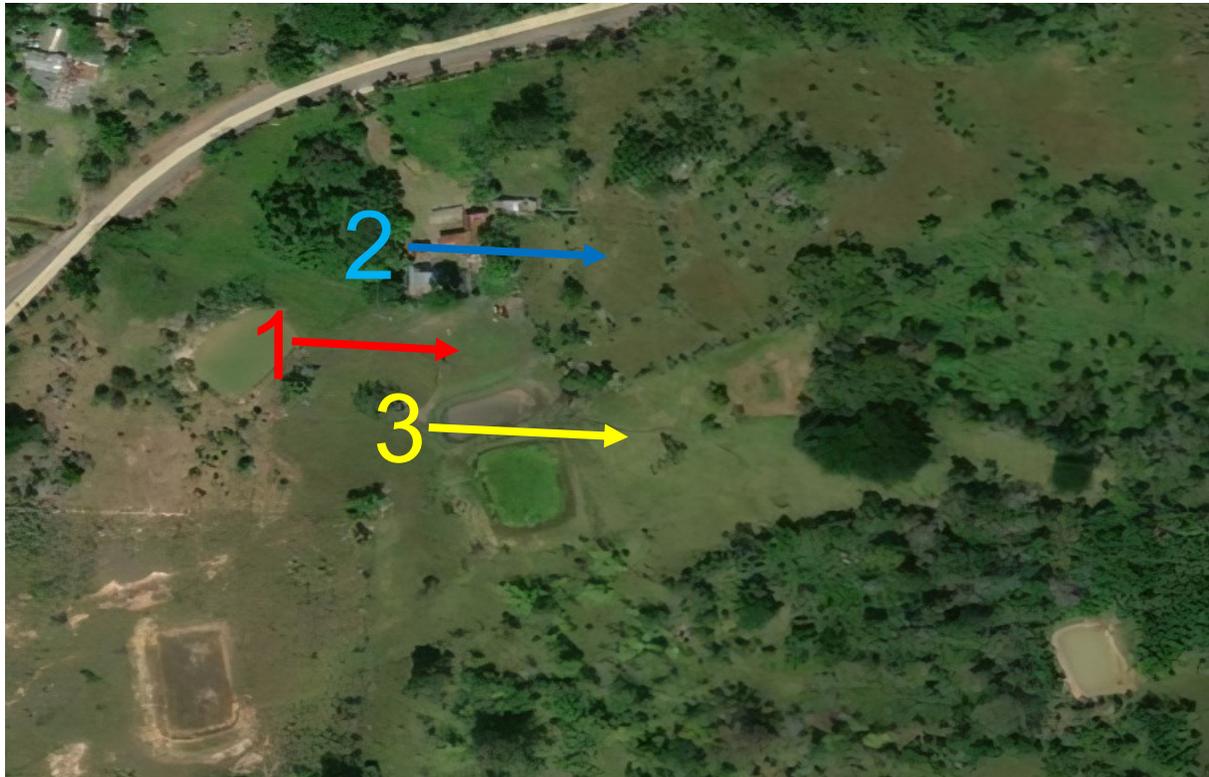
Figura 2-3. Anemómetro utilizado para el proyecto.



Fuente: Manuel A Díaz. 2020

El anemómetro Lutron AM4206M, graba datos de manera automática de acuerdo como este sea programado, para el estudio del proyecto el almacenamiento de datos se realizó cada hora en tres lugares distintos dentro de la finca, figura 2-4, verificando velocidades Max-Min, dato en tabla 2-1.

Figura 2-4. Puntos toma de datos.



Fuente: Manuel A Díaz, 2020.

Debido a situaciones de horarios, las tomas de datos se iniciaron a realizar a partir de las 7:00 am hasta las 10:00 pm en los diferentes puntos marcados en la figura 2-4, dicho horario y lugar de medición fueron dadas por el propietario de la finca, teniendo en cuenta que no puede haber obstáculos que pudiesen alterar la medición y que no fueran tan retirada de los puntos de conexión en la Finca.

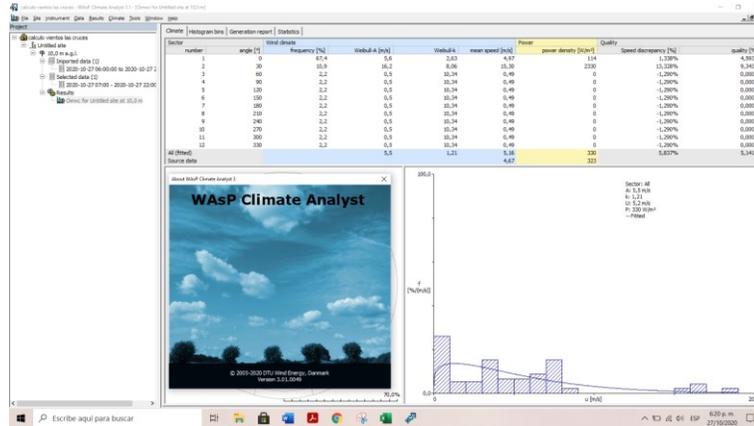
Tabla 2-1. Toma de datos en la finca El Puento.

Datos Del Viento Finca El Puento				
Fecha de Inicio: 4 de octubre de 2020				
fecha de Finalizado: 6 de octubre de 2020				
Hora de Inicio: 7:00 am				
Hora de Finalizado: 10:00 pm				
Tipo de Velocidad del Viento: Brisa débil, Escala Beaufort # 3				
LUGAR: Se Toma En tres puntos de la finca El Puento				
Datos Tomados: Anemómetro Lutron AM4206M				
No. Dato	Hora	Velocidad del Viento m/ seg		
		Punto 1	Punto 2	Punto 3
Dato 1	7:00 a. m.	7,03	6,08	4,34
Dato 2	8:00 a. m.	3,08	3,55	1,34
Dato 3	9:00 a. m.	2,09	4,33	5,22
Dato 4	10:00 a. m.	1,55	2,22	0,6
Dato 5	11:00 a. m.	1,11	0,7	3,34
Dato 6	12:00 p. m.	1,76	1,02	1,42
Dato 7	1:00 p. m.	0,77	0,6	0,98
Dato 8	2:00 p. m.	1,3	1,34	3,2
Dato 9	3:00 p. m.	2	4,24	0,83
Dato 10	4:00 p. m.	3,5	3,54	7,64
Dato 11	5:00 p. m.	4,25	6,54	5,53
Dato 12	6:00 p. m.	6,08	7,31	7,21
Dato 13	7:00 p. m.	6,47	6,78	3,56
Dato 14	8:00 p. m.	7,22	5,58	7,33
Dato 15	9:00 p. m.	7,3	16,8	8,76
Dato 16	10:00 p. m.	18,22	15,32	16,3
Vel Promedio		4,61	5,37	4,85
Vel Max		18,22	16,8	16,3
Vel Min		0,77	0,6	0,6

Fuente: Manuel A Diaz, 2020.

En total se recolectaron 48 Datos de velocidades del viento, estas fueron evaluadas en el Software Wasp Climate Analyst (figura 2-5) que procesa datos eólicos, se en carga de evaluar y pronosticar velocidades del viento.

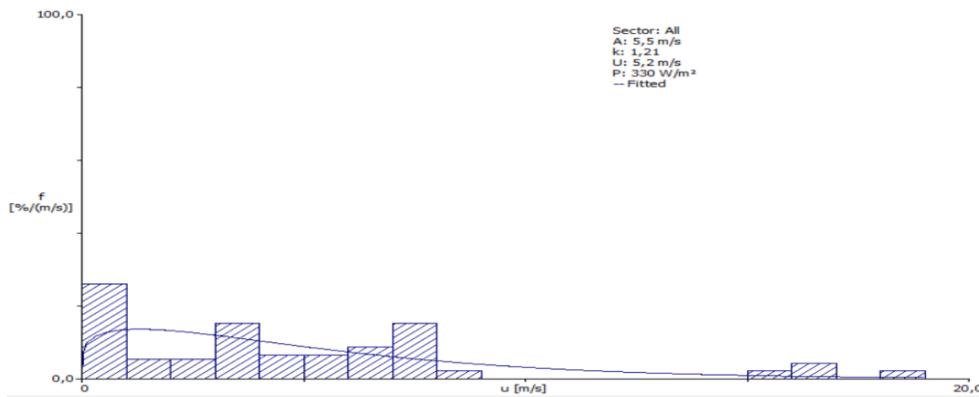
Figura 2-5. Software Wasp climate analyst.



Fuente: Software Wasp instalado.

La grafica 2-1, muestra la distribución de Weibull¹, que tiene una velocidad media estimada de 5,2 m/s y una potencia calculada de 330 W/m². Los resultados encontrados provienen de la organización estadística de datos obtenidos previamente. Sin embargo, el objetivo del software es mostrar la forma correcta de la distribución de Weibull mediante los datos registrados en los 3 puntos de la finca, esta grafica será comparada, mediante la realización de la teoría en el software Excel de office.

Figura 2-6 Distribución de Weibull de los datos tomados.



Fuente: Elaborado por WAsP versión 3, 2020.

¹ La Distribución de Weibull, es la teoría de probabilidad y estadística, que se utiliza para calcular las probabilidades de velocidades del viento, esta teoría se utiliza para cálculos del IDEAM en el Atlas del Viento.

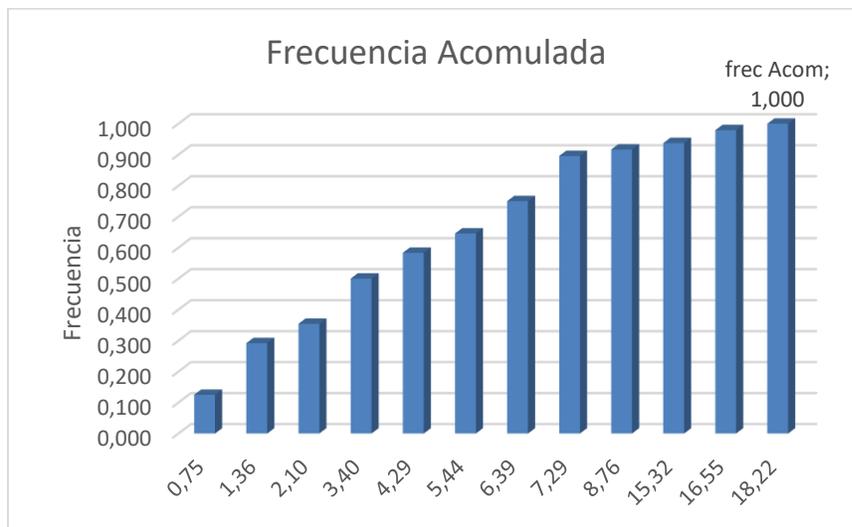
Con los anteriores datos (tabla 2-1) y con el procesamiento de los datos en la distribución Weibull, obtenemos los datos de velocidad promedio por hora, que se clasifican por partes; en otras palabras, todo el rango de cambios de velocidad del viento se divide en partes de 1 m/seg, y la distribución de la frecuencia del viento restante se muestra en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2. Tabla de distribución de frecuencia.

Promedio Vel m/s	Frecuencia Absoluta	Frecuencia relativa	Frecuencia Acumulada
0,75	6	0,125	0,125
1,36	8	0,167	0,292
2,10	3	0,063	0,354
3,40	7	0,146	0,500
4,29	4	0,083	0,583
5,44	3	0,063	0,646
6,39	5	0,104	0,750
7,29	7	0,146	0,896
8,76	1	0,021	0,917
15,32	1	0,021	0,938
16,55	2	0,042	0,979
18,22	1	0,021	1,000
Total, Horas	48		

Fuente: Manuel A Díaz, 2020.

Figura 2-7 . Frecuencia acumulada.



Fuente: Manuel A Díaz, 2020.

2.3 Distribución de Weibull

La distribución de probabilidad de Weibull nos permite describir la variación del viento en una ubicación típica, ya representa en gran medida la asimetría que exhibe el comportamiento del viento. En este sentido, la desviación estándar asociada a esta distribución permite evaluar la dispersión de un conjunto de datos alrededor de su media en función de los parámetros de la distribución de Weibull (IDEAM - UPME, 2017).

En la mayoría de los casos de provecho energético, la distribución de probabilidad del viento, sigue aproximadamente la función de densidad de probabilidad de Weibull. La función de densidad de probabilidad $p(v)$ correspondiente a la ley de Weibull es del tipo de dos parámetros (k, c) y viene dada por la Ecuación:

Ecuación 2-1. Ecuación función probabilidad del viento.

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

En donde:

- v es la velocidad del viento (m/s).
- $p(v)$ es la función densidad de probabilidad de Weibull.
- C es el factor de escala (m/s), valor próximo a la velocidad media anual. También se acostumbra a designar por A.
- K es el factor de forma que caracteriza la asimetría o sesgo de la función $p(v)$

2.3.1 Propiedades de la función de Weibull

En dicha función, se presentan algunas de las propiedades de la función de Weibull que nos ayudaran en los posteriores cálculos:

a) La densidad de probabilidad tiene un máximo o moda para la velocidad (V_m):

Ecuación 2-2. Relación velocidad media y factor de escala

$$\frac{v_m}{c} = \left(\frac{k-1}{k} \right)^{1/k}$$

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

La probabilidad que la velocidad de viento sea menor o igual que un cierto valor de V , viene dada por la distribución acumulada F , definida por:

Ecuación 2-3. Frecuencia acumulada de las velocidades $v > 0$ = que un valor de V .

$$F(v \leq V) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

b) La distribución acumulada complementaria F' permite calcular la frecuencia acumulada de las velocidades que son mayores o iguales que un valor de V :

Ecuación 2-4. Frecuencia acumulada para velocidades $v < 0$ = que un Valor de V

$$F'(v \geq V) = e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

2.3.2 Parámetros estadísticos de la distribución de Weibull

La velocidad media anual ($\langle v \rangle$), la mediana (\tilde{V}) y la varianza σ^2 , para una distribución de Weibull se calculan según:

Ecuación 2-5. Velocidad Media Anual (a), La Mediana (b), La Varianza(c).

$$\mathbf{a.} \quad \langle v \rangle = c \Gamma \left(1 - \frac{1}{k} \right)$$

$$\mathbf{b.} \quad \tilde{V} = c (\ln 2)^{1/k}$$

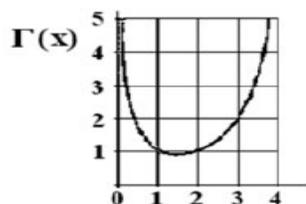
$$\mathbf{c.} \quad \frac{\sigma^2}{c^2} = \Gamma \left(1 - \frac{1}{k} \right) - \left[\Gamma \left(1 - \frac{1}{k} \right) \right]^2$$

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

En donde $\Gamma(x)$ es la función gamma, en la tabla 2-3 se evidencia los valores de esta función.

Tabla 2-3. Distribución Gamma

x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
1,00	1,00000	1,25	0,90640	1,50	0,88623	1,75	0,91906
1,01	0,99433	1,26	0,90440	1,51	0,88659	1,76	0,92137
1,02	0,98884	1,27	0,90250	1,52	0,88704	1,77	0,92376
1,03	0,98355	1,28	0,90072	1,53	0,88757	1,78	0,92623
1,04	0,97844	1,29	0,89904	1,54	0,88818	1,79	0,92877
1,05	0,97350			1,55	0,88887		
1,06	0,96874	1,30	0,89747	1,56	0,88964	1,80	0,93138
1,07	0,96415	1,31	0,89600	1,57	0,89049	1,81	0,93408
1,08	0,95973	1,32	0,89464	1,58	0,89142	1,82	0,93685
1,09	0,95546	1,33	0,89338	1,59	0,89243	1,83	0,93969
		1,34	0,89222			1,84	0,94261
1,10	0,95135	1,35	0,89115	1,60	0,89352	1,85	0,94561
1,11	0,94740	1,36	0,89018	1,61	0,89468	1,86	0,94869
1,12	0,94359	1,37	0,88931	1,62	0,89592	1,87	0,95184
1,13	0,93993	1,38	0,88854	1,63	0,89724	1,88	0,95507
1,14	0,93642	1,39	0,88785	1,64	0,89864	1,89	0,95838
1,15	0,93304			1,65	0,90012	1,90	0,96177
1,16	0,92980	1,40	0,88726	1,66	0,90167	1,91	0,96523
1,17	0,92670	1,41	0,88676	1,67	0,90330	1,92	0,96877
1,18	0,92373	1,42	0,88636	1,68	0,90500	1,93	0,97240
1,19	0,92089	1,43	0,88604	1,69	0,90678	1,94	0,97610
		1,44	0,88581			1,95	0,97988
1,20	0,91817	1,45	0,88566	1,70	0,90864	1,96	0,98374
1,21	0,91558	1,46	0,88560	1,71	0,91057	1,97	0,98768
1,22	0,91311	1,47	0,88563	1,72	0,91258	1,98	0,99171
1,23	0,91075	1,48	0,88575	1,73	0,91467	1,99	0,99581
1,24	0,90852	1,49	0,88595	1,74	0,91683	2,00	1,00000



$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad x > 0$$

$$\Gamma(x + 1) = x \Gamma(x)$$

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

2.3.3 Parámetros para los cálculos energéticos

Un parámetro notable es la media anual del cubo de las velocidades (V^3), que no es igual al cubo de la velocidad media anual (V)³, para la distribución de Weibull se da de la siguiente manera:

Ecuación 2-6. Valor medio del cubo de las velocidades del viento.

$$\langle v^3 \rangle = c^3 \Gamma\left(1 - \frac{3}{k}\right)$$

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

La velocidad eficaz \mathbf{V}^* se define como aquella velocidad que elevada al cubo coincide con la media anual de los cubos de las velocidades.

Ecuación 2-7. Velocidad eficaz.

$$v^* = \langle v^3 \rangle^{1/3}$$

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

De la expresión anterior se obtiene el siguiente conjunto de relaciones:

Ecuación 2-8. Velocidad media anual/parámetro c.

$$\frac{\langle v \rangle}{c} = \Gamma \left(1 - \frac{1}{k} \right)$$

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

Ecuación 2-9. Desviación estándar/velocidad media anual.

$$\frac{\sigma}{\langle v \rangle} = \left[\frac{\Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right)}{\Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{k} \right)} - 1 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

Ecuación 2-10. Factor de energía o factor de potencia eólica (F_e).

$$F_e = \frac{\langle v^3 \rangle}{\langle v \rangle^3} = \frac{\Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right)}{\Gamma^3 \left(1 + \frac{1}{k} \right)}$$

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

2.3.4 Cálculo de los parámetros de Weibull

Los parámetros de Weibull (**c** y **k**) se determinan a partir de un ajuste por mínimos cuadrados a través de la distribución acumulada $F(v)$:

$$F(v) = 1 - e^{-(v/c)^k}$$

Aplicando el logaritmo natural a la ecuación anterior, se obtiene:

$$\ln(1 - F(v)) = -\left(\frac{v}{c}\right)^k$$

$$\ln[-\ln(1 - f(v))] = K \ln v + K \ln c$$

Se procede al ajuste por mínimos cuadrados a la recta: $y = Kx + B$, en donde:

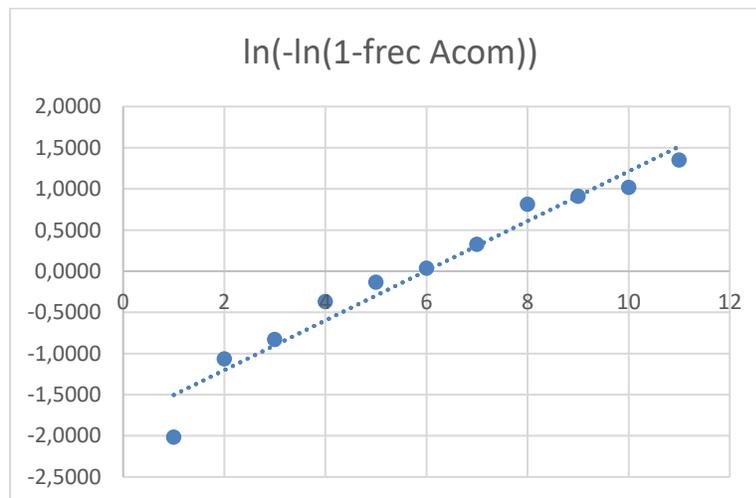
Ecuación 2-11. Ajuste por mínimos cuadrados.

$$y = \ln[-\ln(1 - F)]; \quad x = \ln v; \quad B = -k \ln c$$

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

Calculada la recta por mínimos cuadrados, su pendiente proporciona el valor de **k**, según (figura 2-8) obtenida con los datos en la Tabla 2-2 y el valor de **C** se lo obtiene a partir de la Ecuación 12:

Figura 2-8 Recta por mínimo cuadrado.



Fuente: Manuel A Díaz, 2020.

Ecuación 2-12. Factor de escala.

$$c = e^{-\left(\frac{B}{k}\right)}$$

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

Las expresiones usadas para calcular los coeficientes de la recta de regresión lineal son:

Ecuación 2-13. Valor coeficiente **A** de la recta.

$$A = \frac{\sum fixiyi - (\sum fixi)(\sum fiyi)}{\sum fix_i^2 - (\sum fixi)^2}$$

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

Ecuación 2-14. Valor coeficiente **B** de la recta.

$$B = \sum fiyi - A \sum fixi$$

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

La Tabla 2,4 muestra el cálculo de los parámetros de la función densidad de probabilidad de Weibull y así obtener datos necesarios para reemplazar en las ecuaciones 13 y 14.

Tabla 2-4. Cálculo de los Datos Estadísticos

DATOS				CÁLCULO					
Vel m/s	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa	Frecuencia Acumulada	yi	xi	Productos			
Vi	ni	fi = ni/Σni	Fi	ln(-ln(1-frecuencia acumulada))	Ln Vi	fi*xi	fi*xi ²	fi*yi	fi*xi*yi
0,75	6	0,125	0,125	-2,0134	-0,2921	-0,0365	0,0107	-0,2517	0,0735
1,36	8	0,167	0,292	-1,0647	0,3038	0,0506	0,0154	-0,1774	-0,0539
2,10	3	0,063	0,354	-0,8273	0,7435	0,0465	0,0346	-0,0517	-0,0384
3,40	7	0,146	0,500	-0,3665	1,2225	0,1783	0,2180	-0,0534	-0,0653
4,29	4	0,083	0,583	-0,1330	1,4563	0,1214	0,1767	-0,0111	-0,0161
5,44	3	0,063	0,646	0,0373	1,6944	0,1059	0,1794	0,0023	0,0039
6,39	5	0,104	0,750	0,3266	1,8547	0,1932	0,3583	0,0340	0,0631
7,29	7	0,146	0,896	0,8161	1,9867	0,2897	0,5756	0,1190	0,2365
8,76	1	0,021	0,917	0,9102	2,1702	0,0452	0,0981	0,0190	0,0412
15,32	1	0,021	0,938	1,0198	2,7292	0,0569	0,1552	0,0212	0,0580
16,55	2	0,042	0,979	1,3536	2,8064	0,1169	0,3282	0,0564	0,1583
18,22	1	0,021	1,000						
Total, Horas	48					1,1681	2,1501	-0,2934	0,4606

Fuente: Manuel A Diaz, 2020.

Observando los datos de la tabla 2-4, vamos a utilizar la sumatoria de los productos de los cálculos.

$$A = \frac{\sum fixiyi - (\sum fixi)(\sum fiyi)}{\sum fix_i^2 - (\sum fixi)^2}$$

$$A = \frac{0,4606 - (1,1681)(-0,2934)}{2,1501 - (1,1681)^2}$$

$$A = 1,022$$

$$B = \sum fiyi - A \sum fixi$$

$$B = -0,2934 - 1,022(1,1681)$$

$$B = -1,488$$

Como $k = A = 1,022$ y $B = -1,488$. Entonces se reemplaza en la ecuación (12).

$$c = e^{-\left(\frac{B}{k}\right)}$$

$$c = e^{-\left(\frac{-1,488}{1,022}\right)}$$

$$C = 4,288 \frac{m}{seg}$$

Conocido el factor de forma **K = 1,022** y el factor de escala **C = 4.288 (m/s)**, se reemplaza los valores en la ecuación 1:

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

$$P(v) = \frac{1,022}{4,288} \left(\frac{v}{4,288}\right)^{1,022-1} e^{-\left(\frac{v}{4,288}\right)^{1,022}} = 0.1920$$

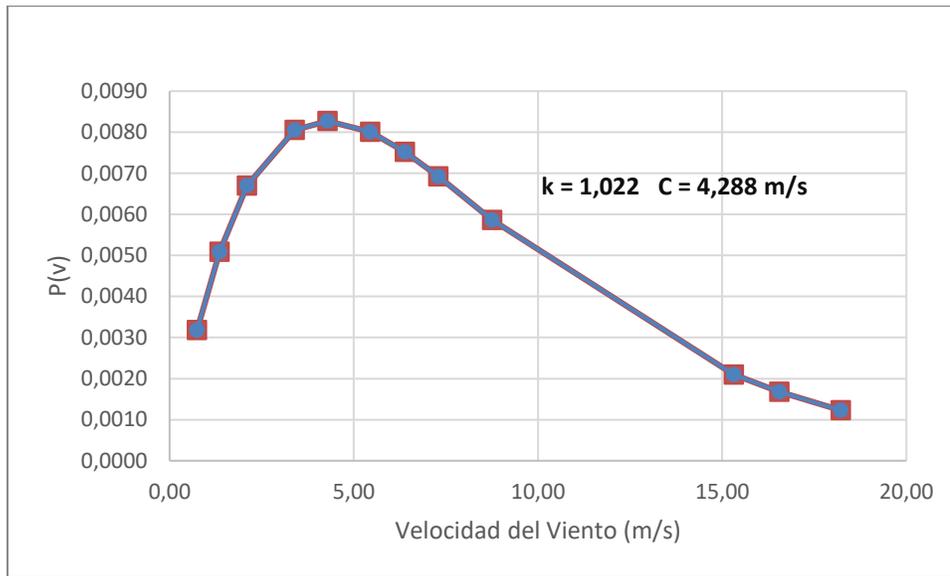
Se reemplaza los valores de **V** para obtener cada uno de los valores de densidad de probabilidad de Weibull correspondientes.

Tabla 2-5. Cálculo de la densidad de probabilidad de Weibull.

V (m/s)	P(v)
0,75	0,1920
1,36	0,1682
2,10	0,1421
3,40	0,1056
4,29	0,0857
5,44	0,0655
6,39	0,0524
7,29	0,0424
8,76	0,0300
15,32	0,0064
16,55	0,0048
18,22	0,0032

Fuente: Manuel A Diaz, 2020.

Figura 2-9 Distribución de Densidad de Probabilidad de Weibull.



Fuente: Manuel A Diaz, 2020.

La figura 2-9 muestra la función de densidad de probabilidad de Weibull de la velocidad del viento en el sitio de estudio, con factor de tamaño **K=1.022** y factor de escala **C=4.488 m/s**. Igual que el gráfico de frecuencia de velocidad del viento y la tendencia de la gráfica 2-1 del Software Wasp.

2.4 Análisis del potencial eólico disponible

Tomando en cuenta que una masa del aire m con velocidad v posee una energía cinética E_c que viene dada por:

Ecuación 2-15. Energía cinética.

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

El caudal másico de aire \dot{m} de densidad(ρ) que fluye a través de una superficie de área (A) perpendicular a la dirección de flujo, la encontramos en la ecuación:

Ecuación 2-16. Caudal másico.

$$\dot{m} = \rho Av$$

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

La potencia disponible (P_d) asociada al caudal del aire que atraviesa esta sección es:

Ecuación 2-17. Potencia disponible.

$$P_d = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

Se define la densidad de potencia o potencia por unidad de área:

Ecuación 2-18. Densidad de potencia por unidad de área.

$$\frac{P_d}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3$$

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

La densidad de potencia depende linealmente de la densidad del aire. La expresión aproximada se puede utilizar para calcular la densidad en función de la temperatura y la altitud sobre el nivel del mar, (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012):

Ecuación 2-19. Densidad del aire

$$\rho = 1.225 \left(\frac{288}{t + 273} \right) e^{-\left(\frac{h}{8435} \right)}$$

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

Donde:

- ρ es la densidad del aire Kg/m³
- t es la temperatura en grados centígrados (°C)
- h es la altura sobre el nivel del mar (m)

El potencial eólico disponible de una ubicación también se define como la potencia eólica promedio por unidad de área durante un cierto período de tiempo asumiendo una densidad de aire constante.

Ecuación 2-20. Potencial eólico disponible en función de la V_m cúbica y de la V_m .

$$\frac{\langle P_d \rangle}{A} = \frac{1}{2} \rho \langle V^3 \rangle = \frac{1}{2} \rho F_e \langle V \rangle^3$$

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

Para el cálculo de la potencia disponible utilizamos la ecuación (20).

$$\frac{(P_d)}{A} = \frac{1}{2} \rho F_e (v)^3$$

Se determina la densidad, la velocidad media y el factor de energía del lugar de estudio con las ecuaciones (19), (5) y (10) respectivamente. Para la Finca El Puente la $h = 1285.5$ msnm según Gps ilustración y una temperatura promedio de 18°C aproximadamente, remplazando en la ecuación 19:

Figura 2-10. Gps toma de msnm.



Fuente: Gps Status 9.2.194.

$$p = 1.225 \left(\frac{288}{t + 273} \right) e^{-\left(\frac{h}{8435}\right)}$$

$$p = 1,225 \left(\frac{288}{18 + 273} \right) e^{-\left(\frac{1285,5}{8435}\right)} = 1,045 \frac{kg}{m^3}$$

$$p = 1,045 \frac{Kg}{m^3}$$

Velocidad media, se reemplaza en la ecuación 5 viñeta (a), donde tenemos el valor de **C = 4.288 m/s** y **K= 1.022**, obtendremos la velocidad media anual.

$$\langle v \rangle = c \Gamma \left(1 - \frac{1}{k} \right)$$

$$\langle v \rangle = 4.288 \Gamma \left(1 - \frac{1}{1,022} \right)$$

$$\langle v \rangle = 4.288 \Gamma(1.98)$$

Utilizando la tabla 2-3 para la distribución de la función gamma (encerrada en azul) obtenemos.

$$\langle v \rangle = 4.288 (0,99171)$$

$$\langle v \rangle = 4,25 \frac{m}{s}$$

Factor de energía (F_e), se reemplazan los valores en Ecuación 10.

$$F_e = \frac{\langle v^3 \rangle}{\langle v \rangle^3} = \frac{\Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right)}{\Gamma^3 \left(1 + \frac{1}{k} \right)}$$

$$F_e = \frac{\Gamma \left(1 + \frac{3}{1,022} \right)}{\Gamma^3 \left(1 + \frac{1}{1,022} \right)}$$

$$F_e = \left(\frac{\Gamma(3,93)}{\Gamma^3(1,98)} \right)$$

$$F_e = 2,93 \left(\frac{\Gamma(1,93)}{\Gamma^3(1,98)} \right)$$

$$F_e = 2,93 \left(\frac{\Gamma(1,93)}{\Gamma^3(1,98)} \right)$$

Usando la tabla de la Función gamma (encerrado en azul), obtendremos.

$$F_e = \frac{2,93(0,97240)}{(0,99581)^3}$$

$$F_e = 2.89$$

Reemplazando los valores obtenidos en $\rho = 1,045 \text{ Kg/m}^3$, $(V) = 4,25 \text{ m/s}$ y $F_e = 2.89$ en la ecuación 20 se tendrá lo siguiente:

$$\frac{(P_d)}{A} = \frac{1}{2} \rho F_e (v)^3$$

$$\frac{(P_d)}{A} = \frac{1}{2} (1,045) (2,89)(4,25)^3$$

$$\frac{(P_d)}{A} = 160,84 \frac{W}{m^2}$$

2.5 Consumo eléctrico de la finca El Puente

Como parte del proceso de investigación se realizó un análisis de consumo eléctrico estimado mensual de la finca, con todos los equipos eléctricos que se utilizan a diario o en su defecto con un estimado promedio diario, como es el caso de los motores eléctricos, necesario para mover el beneficiadero de café en los tiempos de cosecha o cuando es necesario encender la pica pasto para dar alimento a los animales que allí se encuentren. Entorno a lo mencionado se realizó una tabla 2-6 de consumo mensual de electricidad.

Tabla 2-6. Consumo eléctrico finca El Puente.

Equipos	Consumo w por equipo	Número de equipos	Horas de consumo	W/día	Kw/día	Kw/mes
Nevera	400	1	24	9600	9,6	288
Bombilla	60	10	4	2400	2,4	72
Lámpara Luminaria	300	2	4,5	2700	2,7	81
Televisor	62	1	4	248	0,248	7,44
Motor Despulpadora	746	1	0,5	373	0,373	11,19
Motor Pica pasto	746	1	0,5	373	0,373	11,19
Motobomba	746	1	3	2238	2,238	67,14
Refrigerador Ind	52,5	1	24	1260	1,26	37,8
Licuada	350	1	0,25	87,5	0,0875	2,625
Cerca Eléctrica	5	1	24	120	0,12	3,6
Secadora De Café (Bombilla)	60	8	3	1440	1,44	43,2
Radio	400	1	10	4000	4	120
			Total	24839,5	24,8395	745,185

Fuente: Manuel A Diaz. 2020.

Como se observa en la tabla la finca El Puente tiene un consumo mensual de **745,185 KW** al mes, para poder funcionar con eficiencia en las labores diarias, y así poder sacar productos con calidad al mercado local.

2.6 Elección del aerogenerador

Para seleccionar un aerogenerador en Colombia no están fácil, ya que son muy pocas las empresas que venden este tipo de equipos, aun así se encontró una página en internet de la empresa Proviento S.A.S. que vende esta clase de equipos de las marcas Zonhan de la industria China y Marlec de la industria Inglesa, (proviento, 2020), con características técnica muy favorables para el estudio de viento que se realizó en la finca El Puente en Alpujarra Tolima.

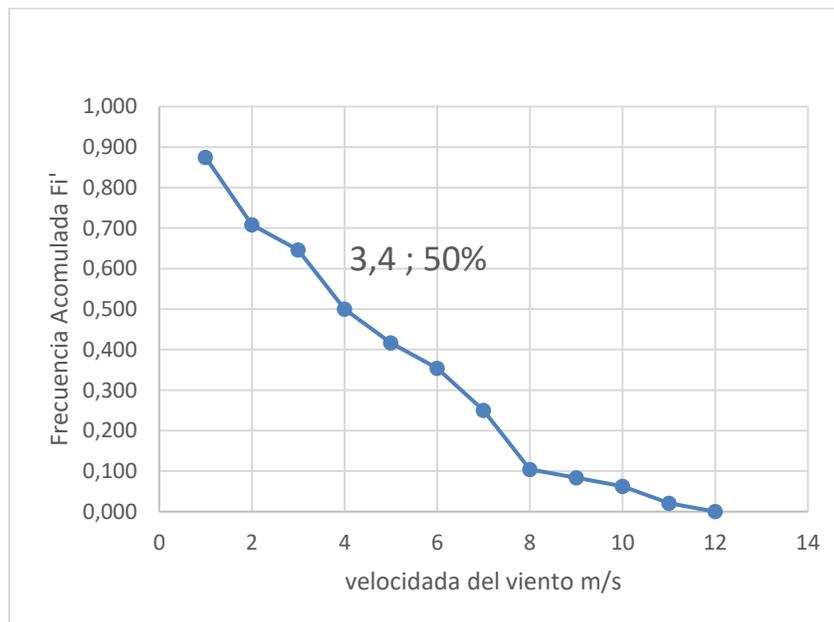
Para la selección de la turbina eólica se toma en cuenta la velocidad de arranque del sistema, considerando que las dos marcas antes mencionadas poseen turbinas con velocidad de arranque entre 2,4 m/s y 4 m/s

Tabla 2-7. Distribución de frecuencias finca El Puento 48 horas.

Vel (m/s)	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa	Frecuencia acumulada	Frecuencia acumulada complementaria
V_i	N_i	$f_i = n_i/\sum n_i$	F_i	F_i'
0,75	6	0,125	0,125	0,875
1,36	8	0,167	0,292	0,708
2,10	3	0,063	0,354	0,646
3,40	7	0,146	0,500	0,500
4,29	4	0,083	0,583	0,417
5,44	3	0,063	0,646	0,354
6,39	5	0,104	0,750	0,250
7,29	7	0,146	0,896	0,104
8,76	1	0,021	0,917	0,083
15,32	1	0,021	0,938	0,062
16,55	2	0,042	0,979	0,021
18,22	1	0,021	1,000	0,000
Total	48			

Fuente. Manuel A Diaz, 2020.

Figura 2-11 Distribución de frecuencias acumuladas.



Fuente: Manuel A Diaz, 2020.

De los datos registrados, se puede observar que el 50% de las horas, 24 horas de las 48 horas de la toma de datos, la velocidad será superior a 3,4 m/s lo que significa que aerogenerador tendrá un inicio de funcionamiento sin problemas, si se escoge alguno de ellos ya que el proveedor cuentan con aerogeneradores con velocidad de arranque de 2,4 m/s en adelante, lo que nos permite tomar en cuenta otro factor importante para seleccionar un aerogenerador, la potencia nominal, esta característica indica que se produce Watts por cada hora de funcionamiento.

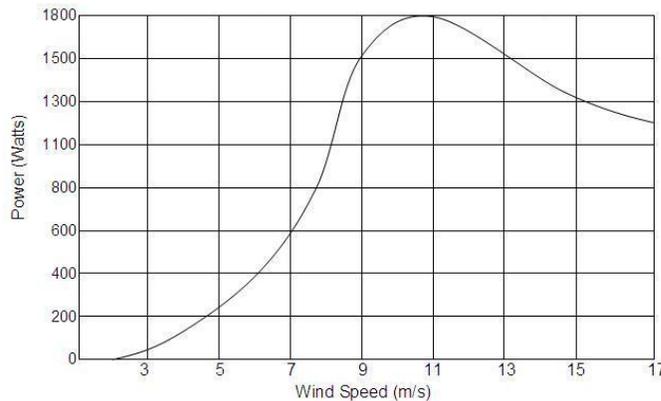
Teniendo en cuenta lo anterior y el consumo eléctrico de la finca, se elige un aerogenerador ZONHAN ZH1.5 cuya característica técnica se observan en la tabla 2-8:

Tabla 2-8. Características técnicas aerogenerador ZONHAN ZH1.5

Característica	Referencia
Diámetro Rotor	3,2 m
Numero De Aspas Y Material	3 aspas De Fibra De Vidrio Reforzadas
Potencia Nominal / Potencia Máxima	1,5 W / 1,8 KW
Velocidad Nominal Del Viento	9 m/s
Velocidad De Arranque Del Viento	2,5 m/s
Velocidad Del Viento De Trabajo	3 - 25 m/s
Velocidad Máxima Del Viento	50 m/s
Tensión De Trabajo	DC24/48V (voltaje más alto opcional)
Tipo De Generador	Imán Permanente Trifásico
Carga	Voltaje Constante
Método De Regulación De Velocidad	Autofurl
Altura De La Torre	12 m
Vida Útil	10 - 15 años

Fuente: (proviento, 2020)

Figura 2-12 Gráfica de potencia nominal del aerogenerador seleccionado.



Fuente: (proviento, 2020)

2.6.1 Cálculo de la potencia máxima del lugar de estudio.

Para el cálculo de la potencia del lugar se utiliza la expresión:

Ecuación 2-21. Potencia Máxima

$$P_{max} = C_p * P_d$$

Fuente: (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

Donde;

C_p es el coeficiente de potencia.

La potencia máxima que teóricamente puede ser aprovechada de un flujo de viento es tan solo un 59,3% de la potencia disponible del mismo. En consecuencia, el valor máximo de coeficiente C_p es igual a 0,593. En la práctica este valor nunca se alcanza, pudiendo llegar a valores superiores a 0,4 en el mejor de casos (López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2012)

La curva de potencia máxima calculada en la finca El Puente (potencia-velocidad) es favorable con las características del aerogenerador seleccionado, por tanto, utilizamos la ecuación 20 y el resultado dado para reemplazar los datos del diámetro de aspas del aerogenerador.

$$\frac{(P_d)}{A} = \frac{1}{2} \rho F_e (v)^3$$

$$\frac{(P_d)}{A} = \frac{1}{2} (1,045) (2,89)(4,25)^3$$

$$\frac{(P_d)}{A} = 160,84 \frac{W}{m^2}$$

Reemplazamos:

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$p_d = 160,84 \left(\frac{\pi(3,8)^2}{4} \right)$$

$$p_d = 1824,11 W$$

Remplazando Pd y Cp = 0.4 en la ecuación (21) tenemos:

$$p_{m_{ax}} = (0,4)(1824,11)$$

$$p_{max} = 729,6 W$$

2.6.2 Análisis exergético

La exergía hace referencia a la utilidad potencial de una determinada fuente de energía. Se puede definir como el trabajo máximo teórico que podría obtenerse de la interacción entre un determinado sistema termodinámico y el ambiente de referencia. Si el estado de una cantidad de materia es diferente al del ambiente, existirá la posibilidad de producir trabajo. Conforme el sistema evolucione hacia el equilibrio con el ambiente, dicha posibilidad se reducirá, (Michael J Moran, 2004).

Modelo exergético para la energía eólica, partiendo de un sistema de flujo, tendremos la ecuación general de exergía de un proceso de flujo:

Ecuación 2-22. Exergía de un proceso de flujo.

$$\Delta X = (U_2 - U_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1) + \dot{m} \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \right) + \dot{m}g(Z_2 - Z_1)$$

Fuente: (Michael J Moran, 2004)

Donde:

- $(U_2 - U_1)$ Es el cambio de la energía interna.
- $P_0 (V_2 - V_1)$ Es el trabajo Pv con respecto a la presión externa.
- $T_0 (S_2 - S_1)$ Es el calor transferido de los alrededores.
- $\dot{m} ((V_2^2 - V_1^2) / 2)$ Es el cambio en la energía cinética del fluido.
- $\dot{m} (Z_2 - Z_1)$ Es el cambio de la energía potencial del fluido.

Realizando el análisis de cada de las ecuaciones anteriores tenemos que para un aerogenerador:

- No varia la T del aire fluyendo, por lo tanto, no hay cambio en la energía interna.
- Como no presenta flujo de calor no hay cambio de la entropía.
- No cambia el volumen porque la densidad es constante y el término PV se hace cero.
- También es posible considerar que no hay variaciones en la energía potencial.
- Cuando se extrae toda la energía cinética, se puede considerar que la velocidad final es cero

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones la ecuación 2-22 queda de la siguiente manera:

Ecuación 2-23. Exergía Eólica.

$$\Delta X = \dot{m} \left(\frac{-V_1^2}{2} \right)$$

Fuente: (Michael J Moran, 2004)

Se puede concluir que, independientemente de la temperatura y presión ambiente, el potencial de trabajo o exergía de la energía cinética del sistema es igual a la energía cinética misma, (Michael J Moran, 2004).

Ecuación 2-24 Exergía de la Energía Cinética

$$X_{ec} = ec = \left(\frac{V^2}{2} \right)$$

Fuente: (Michael J Moran, 2004)

Remplazando $V = 4.25 \text{ m/s}$ en la ecuación (24) tenemos:

$$x_{ec} = ec = \left(\frac{4,25^2}{2}\right) \left(\frac{m^2}{s^2}\right) \left(\frac{1 \frac{Kj}{kg}}{1000 \frac{m^2}{s^2}}\right)$$

$$x_{ec} = ec = 0,00903125 \frac{Kj}{kg}$$

$$\dot{m} = \rho AV = \rho \left(\frac{\pi(D^2)}{4}\right) V$$

Reemplazando los valores obtenidos en $\rho = 1,045 \text{ Kg/m}^3$, $V = 4,25 \text{ m/s}$ y $D = 3,8\text{m}$

$$\dot{m} = (1,045) \left(\frac{\pi(3,8^2)}{4}\right) (4,25)$$

$$\dot{m} = 50,37 \frac{Kg}{s}$$

Remplazando en la ecuación (23).

$$\Delta x = 50,37 \frac{Kg}{s} * 0,00903125 \frac{Kj}{Kg}$$

$$\Delta x = 0,4549 \frac{Kj}{s} = 454,9 \text{ W}$$

Dado que la exergía es el trabajo máximo que puede realizar un sistema, se aplica lo siguiente:

$$p_{max} = 454,9 \text{ W}$$

2.7 Estimación del suministro de energía

Con la información de los resultados obtenidos de la distribución de viento y la curva de potencia es posible determinar una consideración de la producción energía en el periodo de análisis, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2-9. Estimación producción de energía.

	Frecuencia Absoluta	Pd (W)		Pmax (W)	
Vi	ni	Pd*H	(Pd*H)*ni	Pd*Cp	Pmax V Arraq
0,75	6	7,225	43,35	2,89	0
1,36	8	1,36	10,88	0,544	0
2,10	3	158,599	475,797	63,4396	0
3,40	7	673,099	4711,693	269,2396	269,2396
4,29	4	1352,116	5408,464	540,8464	540,8464
5,44	3	2757,014	8271,042	1102,8056	1102,8056
6,39	5	4468,325	22341,625	1787,33	1787,33
7,29	7	6634,754	46443,278	2653,9016	2653,9016
8,76	1	11512,1	11512,1	4604,84	4604,84
15,32	1	61577	61577	24630,8	24630,8
16,55	2	16,55	33,1	6,62	6,62
18,22	1	103582,729	103582,729	41433,0916	41433,0916
Total, H	48		Total, W		77029,4748

Fuente: Manuel A Diaz. 2020.

Considerando la potencia máxima producida en el período de análisis de 48 horas, se realizó multiplicando el número de horas de viento en cada intervalo por el nivel de potencia, donde el aerogenerador comienza a operar según su velocidad de arranque, por lo tanto, la energía total es la suma de la distribución de potencia que se genera a partir del arranque de las aspas. Esta energía es 77,029 KW/h para un promedio de 2 días.

Este nivel de energía corresponde a una capacidad de generación diaria promedio 38,514 KWh/ día, teniendo en cuenta que la velocidad del viento promedio anual es de 4,25 m/s, lo que nos permite analizar la relación del consumo de la finca El Puente con la producción de potencia del aerogenerador seleccionado, mediante la ecuación 2-25 y teniendo en cuenta los datos de las tablas 2-9 y la ecuación $P_{\text{máx}}$ calculado con la velocidad media anual del viento.

Ecuación 2-25. Relación de consumo vs producción de potencia del aerogenerador.

$$CEA \text{ vs } PEEA = \frac{ECD * 1,2 * 365d}{PEEA}$$

Fuente: (Energy, 2019)

Donde ECD es el consumo energético de la finca en un día promedio y el valor 1,2 es el margen de seguridad de carga y PEEA es la producción de energía estimada anual del aerogenerador, (Energy, 2019).

$$CEA \text{ vs } PEEA = \frac{24.84 \frac{Kw}{h} * 1,2 * 365}{14057,90 \frac{Kw}{h}}$$

$$CEA \text{ vs } PEEA = 0.77$$

El resultado 0,77 es menor a uno (1) eso quiere decir que el aerogenerador cubre con las necesidades de la finca, que al cabo de un año generara 1,29 más energía que la que consume, esto permite tener un saldo a favor frente al prestador del servicio eléctrico, en el caso que el propietario de la finca decida tener un servicio autónomo del proveedor eléctrico, se puede almacenar energía eléctrica en baterías, si hubiesen días con poco / nada de vientos o paradas para mantenimiento del aerogenerador, que se harían cada dos años según fabricante, (Energy, 2019).

2.8 Análisis financiero del proyecto

Es el proceso a través del que se analiza la factibilidad de un proyecto. Tomando como base los recursos económicos que tenemos disponibles y el coste total del proceso de producción.

Su finalidad es permitirnos ver si el proyecto que nos interesa es viable en términos de rentabilidad económica, (Barcelona, 2020). Aquí evaluaremos tres variables VPN (Valor presente neto), TIR (Tasa de Interés de Retorno) y el IR (índice de Rentabilidad).

2.8.1 Costos del aerogenerador y su instalación

“Los costos, son los gastos económicos para la producción de un producto o la oferta de un servicio. Los costos incluyen, pero no se limitan a, la compra de suministros, el pago de mano de obra, costos de producción y costos administrativos, (Raffino, 2020)”.

Teniendo el anterior concepto en cuenta, los costos que tendremos para instalación y mantenimiento son los siguientes:

Tabla 2-10. Costos de aerogenerador.

Detalle del Costo	Valor Costo
Aerogenerador	2400 dólares (\$ 9'337.200) con un valor del dólar de \$3890 pesos)
Instalación (Mano de obra, traslado y Componentes Eléctricos)	\$ 16.403.929,12
Mantenimiento cada 2 años	Es el \$ 514.822,58 es el valor de 2% del valor del aerogenerador instalado

Fuente: (proviento, 2020), (Bryan d'Emil, 2001)

En la tabla 2-10 encontramos el valor del aerogenerador seleccionado con valor a dólares y trasladado a valor del peso colombiano para más claridad, los valores de instalación se determinaron teniendo en cuenta la economía progresiva que se calcula según la potencia del aerogenerador, y el valor del mantenimiento se determina con el cálculo del 2% del valor del aerogenerador instalado y se tomara cada dos años, (Bryan d'Emil, 2001).

Para la tabla 2-11, se realizó el cálculo del valor de la electricidad consumida en la finca mensualmente, se sabe que puede variar mes a mes, por eso este valor de cálculo se realizó teniendo en cuenta el consumo regular promedio de la electricidad de la finca.

Tabla 2-11. Valor consumo de la finca El Puente.

Detalle	Consumo	Básico (subsidio)	Valor pleno
Total, Kwh Por Mes	745,185	130	\$ 615,185
Precio Por Kwh		\$ 355,05	\$ 607,97
Precio Kwh Por Mes		\$ 46.156,50	\$ 374.014,02
		Total, mes	\$ 420.170,52
		Total, prom año	\$ 5.042.046,29

Fuente: Manuel A Diaz, 2020.

Para determinar la viabilidad del proyecto, se realizó el análisis financiero del mismo donde se calcula las variables VPN, TIR e IR. Se calculó a un periodo de 10 años de flujos netos de efectivos con una tasa de interés de 10%. Los ingresos son precios de la energía que dejaría de pagar a la prestadora del servicio de energía, en este caso la empresa Celsia S.A. para el departamento del Tolima.

Tabla 2-12. Análisis financiero del proyecto.

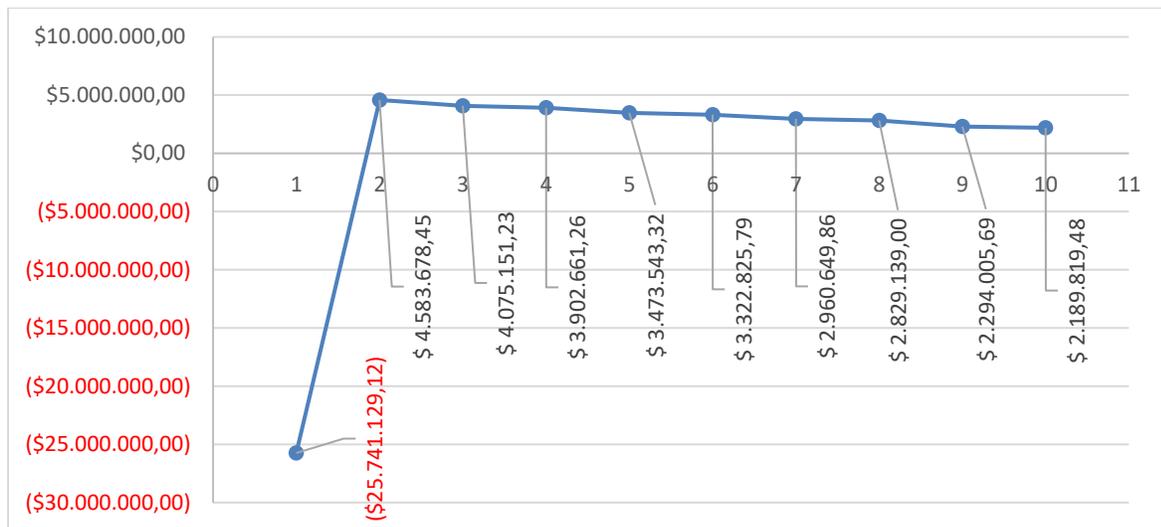
Datos	Inversión inicial	\$ 25.741.129,12
	Tasa de descuento	10%

Periodo años	Ingreso	Egreso	Flujo de Efectivo Neto	Valor Presente
0			-\$ 25.741.129,12	-\$ 25.741.129,12
1	\$ 5.042.046,29		\$ 5.042.046,29	\$ 4.583.678,45
2	\$ 5.117.676,99	\$ 514.822,58	\$ 4.602.854,41	\$ 3.804.011,91
3	\$ 5.194.442,14		\$ 5.194.442,14	\$ 3.902.661,26
4	\$ 5.272.358,77	\$ 514.822,58	\$ 4.757.536,19	\$ 3.249.461,23
5	\$ 5.351.444,16		\$ 5.351.444,16	\$ 3.322.825,79
6	\$ 5.431.715,82	\$ 514.822,58	\$ 4.916.893,24	\$ 2.775.458,05
7	\$ 5.513.191,56		\$ 5.513.191,56	\$ 2.829.139,00
9	\$ 5.595.889,43	\$ 514.822,58	\$ 5.081.066,85	\$ 2.154.868,35
10	\$ 5.679.827,77		\$ 5.679.827,77	\$ 2.189.819,48
Valor Presente De La Suma De Flujos Netos				\$ 29.631.474,08
Valor Presente Neto (VPN)				\$ 3.890.344,96
Tasa De Interés De Retorno (TIR)				14%
Índice De Rentabilidad Razón Beneficio/Costo (IR)				1,17

Fuente: (Villeda, 2020), Elaboro: Manuel A Diaz, 2020.

El flujo neto se lo obtiene al sumar todos los ingresos y restar los egresos. Con el valor de los ingresos y egresos se puede obtener el flujo neto de efectivo de cada período:

Figura 2-13 Flujo Neto de Efectivo.



Fuente: Manuel A Diaz. 2020.

El IR se calcula, hallando la suma de los beneficios descontados (valor consumo energía anual estimado), traídos al presente, y se divide sobre la suma de los costos, (Villeda, 2020). Para determinar la aceptabilidad del trabajo, se debe tener en cuenta los siguiente:

- IR > 1 indica que los beneficios superan los costes, por consiguiente, el proyecto debe ser considerado.
- IR=1 Aquí no hay ganancias, pues los beneficios son iguales a los costes.
- IR < 1, muestra que los costes son mayores que los beneficios, no se debe considerar.

Como se evidencia en la tabla 2-12, el valor del **IR = 1,17**, lo que indica que los beneficios superan los costos y que el trabajo debe ser aceptado.

El resultado obtenido en la TIR es otro de los parámetros que ayuda a decidir si el proyecto es factible o no. Este resultado indica que el proyecto es rentable en un 14%, está en el propietario de la finca arriesgarse o no a ejecutarlo.

3. Conclusiones y recomendaciones

3.1 Conclusiones

La implementación de un aerogenerador, soluciona el problema de los altos costo del servicio eléctrico de la finca, maximizando las ganancias, ya que la vida útil del aerogenerador seleccionado tiene una garantía de 15 años, también el desabastecimiento de energía que se tiene en la finca, provocados por cortes repentinos que detienen los procesos producción de la finca. Con esto se concluye que el estudio es factible para implementación de un sistema de generación eólica en la finca El Puente, ya que solucionaría los problemas declarados en este trabajo.

Los resultados determinados de las velocidades del viento en la Finca El Puente, comprueba su viabilidad técnica, ya que el estudio de vientos arroja velocidades promedio anual de 4,25 m/s, bastante significativas para el funcionamiento del aerogenerador seleccionado que requieren una velocidad de arranque de 2,5 m/s en promedio y para su óptimo rendimiento 9 m/s.

El lugar más favorable para la instalación del aerogenerador, es el punto número 1, el cual está a 30 m de distancia de la casa, en la coordenada 3°25'28" N y 74°55'12" W, allí no tiene obstáculos que alteren la velocidad del viento y de fácil acceso para la instalación, en ese mismo punto se registró el dato de la velocidad más alta (18 m/s).

En la relación de consumo de la finca vs el potencias de generación del aerogenerador arrojó el resultado $0,77 < 1$ eso quiere decir que el aerogenerador cubre con las necesidades de la finca, que al cabo de un año generara 1,29 más energía que la que consume, esto permite tener un saldo a favor frente al prestador del servicio eléctrico, en el caso que el propietario de la finca decida tener un servicio autónomo del proveedor eléctrico, se puede almacenar energía eléctrica en baterías, si hubiesen días con poco /

nada de vientos o paradas para mantenimiento del aerogenerador, que se harían cada dos años según fabricante.

Los estudios realizados permitieron conocer que la huella de carbono de las centrales hidroeléctricas es 13,4 mayor, a las emisiones generadas por energía eólica, aunque la energía hidroeléctrica ahora se denomina energía limpia, estas no cumplen este criterio ya que, a mayor escala, estas contaminan mucho más, debido a la vegetación en descomposición generada en el proceso de llenado de la represa y afluente abajo. Además de esto, no se determina los efectos sociales-económicos negativos asociados a la cadena de distribución y producción de las hidroeléctricas, por esto y mucha más afectación, la energía eólica debe ser considerada como una tecnología factible sobre la principal matriz eléctrica colombiana.

El cálculo del índice de rentabilidad ($IR = 1,17$) y la Tasa Interna de Retorno ($TIR = 14\%$), determina que la implementación de aerogenerador en la finca EL Puente es factible a un plazo de 10 Años, el cual retornaría el dinero invertido.

3.2 Recomendaciones

Seguir realizando las mediciones de los parámetros meteorológicos a lo largo de un año para tener datos precisos y facilitar el estudio de futuros proyectos que se puedan realizar en el municipio de Alpujarra y en el Tolima en general.

Fomentar la implementación de sistemas eólicos en la comunidad de Alpujarra ya que tienen un gran potencial eólico que se puede aprovechar, y es una fuente alternativa a los cortes de energía que se dan frecuentemente, a la mala calidad del flujo eléctrico y que las personas ya no tienen que hacer fraudes para disminuir el valor de sus recibos de electricidad.

Llevar a cabo estudios de la factibilidad económica previo a la instalación de un sistema eólico, ya que los mercados son cambiantes y se pueden encontrar una gran variedad de aerogeneradores con bajo costo de inversión.

Promover e incentivar a las demás fincas del municipio de Alpujarra en la implementación de aerogeneradores, para que sean más accesibles en cuanto a costos si se compran en cantidad.

Este proyecto puede ser realizable, si se encuentra el financiamiento adecuado por parte de una persona natural o jurídica que invierta en el desarrollo propio o de la comunidad aprovechando todos los beneficios que da la ley la ley 1715 de 2014 en Colombia sobre apoyo a las energías alternativas. También promoviendo este trabajo a subvenciones de proyectos internacionales que se presentan en entidades del gobierno, tales como APC Colombia, entidad que se encarga de suscribir toda clase de subvenciones a nivel internacional internacionales.

Bibliografía

ACCIONA. (2020). *ENERGÍA EÓLICA*. Obtenido de ENERGIAS RENOVABLES:
<https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-eolica/>

Asociación danesa de la industria eólica. (10 de Mayo de 2003). Obtenido de
<http://www.windpower.org/es/tour/wtrb/powerreg.htm>

Atlas Mundial de Carbono. (2018). Obtenido de <http://www.globalcarbonatlas.org/>

Barcelona, U. d. (2020). *Estudio financiero: en qué consiste y cómo llevarlo a cabo*.
Obtenido de <https://obsbusiness.school/es/blog-investigacion/finanzas/>

Bello, N. G. (1997). *Derecho Ambiental Internacional*. Caracas, Venevuela: Equinoccio.

Bnamericas. (10 de julio de 2020). Los 7 principales proyectos eólicos de Colombia. págs.
<https://www.bnamericas.com/es/noticias/los-principales-proyectos-eolicos-de-colombia>.

Bryan d'Emil, M. J. (2001). <http://www.windpower.org/en>. Obtenido de Ministerio de Educación de Dinamarca, el Ministerio de Medio Ambiente y Energía de Dinamarca y la Asociación de la Industria Eólica de Dinamarca.: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/stat/units.htm>

Cabañes, J. L. (11 de abril de 2016). *Comunidad Ism*. Obtenido de
<http://www.comunidadism.es/blogs/la-huella-de-carbono-de-las-energias-renovables-2-eolica>

carbono, W. E. (23 de octubre de 2020). *Energía baja en carbono - Low-carbon power*.
Obtenido de https://es.qaz.wiki/wiki/Low-carbon_power

Channel, T. W. (28 de octubre de 2020). *Radar y mapas del tiempo para Alpujarra, Tolima*.
Obtenido de <https://weather.com/es-CO/tiempo/mapas/interactivo/ae2bd338bde0fc6fc792ed9b84419ae70aa7ef2ab876908dba03025d325baf7f>

Energy, C. I. (8 de octubre de 2019). *Youtube*. Obtenido de <https://youtu.be/pcS20ebasRA>

- Epm. (07 de Octubre de 2020). *Parque Eólico Jepírachi*. Obtenido de <https://www.epm.com.co/site/home/nuestra-empresa/nuestras-plantas/energia/parque-eolico>
- EPME. (2018). *INFORME MENSUAL DE VARIABLES DE GENERACIÓN Y DEL MERCADO ELÉCTRICO COLOMBIANO*. Bogota.
- Escuela de Navegación Santa Pola*. (25 de Enero de 2016). Obtenido de <https://entrenadorpersonalvela.blogspot.com/2016/01/brisas-termica-brisa-marina-y-brisa.html>
- Fog, L. (23 de mayo de 2018). Los efectos de las hidroeléctricas en Colombia más allá de Hidroituango. págs. <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/los-efectos-de-las-hidroelectricas-en-colombia-mas-alla-de-hidroituango/>.
- GEOGRAPHIC, R. N. (5 de septiembre de 2010). *NATIONAL GEOGRAPHIC*. Obtenido de <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/el-poder-del-viento>
- Gilfillan et al, U. (2019). *Global Carbon Atlas*. Obtenido de <http://www.globalcarbonatlas.org/es/CO2-emissions>
- Gómez Páez, S. &. (01 de enero de 2015). *Consecuencias del crecimiento demográfico sobre la calidad de la vida en la ciudad de Bogotá, periodo 1985-2015*. Obtenido de <https://ciencia.lasalle.edu.co/economia/289>
- GWEC, G. W. (2019). *Informe eólico mundial 2019*. BRUCELAS: GWEC - Consejo Global de Energía Eólica.
- Heloísa Schneider, J. S. (2009). *La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de*. Santiago de Chile : producción, distribución y consumo de. Obtenido de https://www.ingenieros.es/files/proyectos/Huella_carbono_prod_dist_consumo.pdf
- Henry Oswaldo Benavides Ballester, G. E. (2007). *INFORMACIÓN TÉCNICA SOBRE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO*. Bogota: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM .
- Hernandez, U. M. (2015). II MÁSTER ENERGÍA SOLAR Y RENOVABLES_MÓDULO ENERGÍA EÓLICA. *II Máster Energía Solar y Renovables. Módulo: Energía eólica Tema 4: Aerogeneradores*. Elche, Alicante, España.
- IDEAM - UPME, J. F. (2017). *ATLAS DE VIENTO*. Bogotá, D. C., Colombia: Imprenta Nacional de Colombia.
- IDEAM. (2017). *TERCERA COMUNICACIÓN NACIONAL DE COLOMBIA A LA CONVENCION MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO*. Bogota DC: Puntoaparte book vertising.

- López, M. V. (2004). *Energía Eólica*. Barcelona, España: Ceac.
- López, M. V. (2012). *Ingeniería de la Energía Eólica*. Barcelona España: Marcombo, S.A.
- López, M. V. (2019). *Ingeniería de la Energía Eólica*. Barcelona, España.: MARCABO, S.A.
- Michael J Moran, H. N. (2004). *Fundamento de Termodinámica Técnica, Edición 2*. Barcelona España: Reverté S.A.
- Naranjo, I. C. (25 de octubre de 2012). *MEDICIÓN DE HUELLA DE CARBONO EN EL SECTOR ENERGÉTICO*. Obtenido de Gaia Servicios Ambientales S.A.S.: <http://www.ambientebogota.gov.co/documents/10157/237324/Medici%C3%B3n+de+la+Huella+de+carbono+en+el+sector+energ%C3%A9tico.pdf>
- Oceana. (2019). Gases de efecto invernadero. *Proteccion de los Océanos del Mundo*.
- proviento. (2020). *proviento*. Obtenido de <http://www.proviento.com.co/aerogeneradores.html>
- Raffino, M. E. (25 de Septiembre de 2020). *Concepto.de*. Obtenido de <https://concepto.de/costo/>
- Sáenz Robles, S. (20 de Febrero de 2013). *MODELOS AGREGADOS DE PARQUES EÓLICOS*. Obtenido de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5189>
- Satellites pro / Mapa de Colombia*. (26 de Septiembre de 2020). Obtenido de https://satellites.pro/mapa_de_Colombia#E3.385265,-74.951413,11
- satellites.pro*. (28 de Octubre de 2020). Obtenido de https://satellites.pro/mapa_de_Colombia#E3.424776,-74.919513,14
- UPME. (Agosto de 2018). *La Unidad de Planeación Minero Energética*. Obtenido de <https://www1.upme.gov.co/Paginas/default.aspx>
- UPME, E. L. (2020). *Informe de Registro de Proyectos de Generación*. UPME. Bogota DC: Angie Katherine Torres y Oliver Díaz Iglesias.
- Villeda, A. E. (7 de Febrero de 2020). *youtube*. Obtenido de Herramientas financieras en Excel (VPN, TIR, IR): <https://youtu.be/VNKgxyu5bPc>
- Wikimedia. (27 de Octubre de 2020). *Energía renovable*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_renovable
- XM, S. E. (06 de febrero de 2020). *En Colombia Factor de emisión de CO2 por generación eléctrica del Sistema Interconectado: 164.38 gramos de CO2 por kilovatio hora*. Obtenido de <https://www.xm.com.co/Paginas/detalle-noticias.aspx?identificador=2383>