

Simulación de un Aerogenerador para Uso Doméstico en el Departamento del Cesar

Fábregas Peña Adalis María y Márquez Ferreira José Eduardo

Universidad de Santander

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Industrial

Valledupar

2022

Simulación de un Aerogenerador para Uso Doméstico en el Departamento del Cesar

Fábregas Peña Adalis María y Márquez Ferreira José Eduardo

Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniero Industrial

Asesor

Pérez Orozco Adith Bismark

Doctor en Ciencias

Universidad de Santander

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Industrial

Valledupar

2022

Dedicatoria

Dedico este proyecto a Dios, por guiarme, darme la sabiduría, la fortaleza y el entendimiento necesario para llevar a cabo este proyecto y perseverar hasta culminarlo. A mi madre por su apoyo, su esfuerzo, sus consejos y por desear siempre lo mejor para mí. A mi padre por su sacrificio todos estos años para permitirme alcanzar este logro. A mis primos, por ser un gran soporte en los momentos más difíciles brindándome ánimo a través de su amor. Y, a todos aquellos que en el transcurso del camino se fueron sumando, aportando energía, conocimiento y paz.

Adalis María Fábregas Peña.

Dedico este proyecto a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto del camino que se encuentra culminando de la mejor manera. A mi madre y mi abuela, por sus consejos, su apoyo incondicional y por ser ese motor que me mantiene inspirado para dar siempre lo mejor de mí.

José Eduardo Márquez Ferreira.

Agradecimiento

A Dios, por darnos la fortaleza para alcanzar este gran sueño. A nuestros padres, por creer y confiar en nuestras capacidades, por cada uno de sus consejos y palabras de aliento. A la Universidad de Santander por abrirnos las puertas y darnos la oportunidad de estudiar ingeniería industrial. Y, a nuestro tutor Adith Pérez, por su asesoría, tiempo y confianza hacia nosotros en el desarrollo de este proyecto.

Tabla de Contenido

Introducción	18
1. El Problema de Investigación	20
1.1 Planteamiento del Problema.....	20
1.1.1 Identificación del Problema	20
1.1.2 Descripción del Problema	20
1.2 Formulación del Problema	23
1.2.1 Sistematización del Problema	24
1.3 Objetivos de la Investigación	24
1.3.1 Objetivo General.....	24
1.3.2 Objetivos Específicos.....	24
1.4 Justificación.....	25
1.4.1 Teórico	29
1.4.2 Metodológico	29
1.4.3 Social.....	30
1.4.4 Práctico	30
1.5 Delimitación de la Investigación.....	31
1.5.1 Espacial	31
1.5.2 Temporal	31
1.5.3 Teórica	31

1.5.4 Institucional.....	31
2. Marco Teórico.....	32
2.1 Antecedentes	32
2.2 Bases Teóricas.....	37
2.2.1 Energía Eólica.....	37
2.2.2 Aerogeneradores	38
2.2.3 Tipos de Aerogeneradores	38
2.2.4 Energía Eólica en Colombia	40
2.3 Marco Conceptual	41
2.3.1 Generación de la Energía Eólica.....	41
2.3.2 Partes de un Aerogenerador	41
2.3.3 Condiciones del Viento en el Cesar	44
2.4 Definición Nominal de la Variable	46
2.4.1 Conversión de la Energía Eólica a Energía Eléctrica	46
2.4.2 Cuadro de Operacionalización de Variables.....	48
3. Metodología de la Investigación.....	50
3.1 Marco Metodológico de la Investigación.....	50
3.1.1 Tipo de Investigación.....	50
3.1.2 Diseño de la Investigación.....	50
3.1.3 Instrumentos de Recolección de Datos	51

SIMULACIÓN DE AEROGENERADOR DÓMESTICO	8
3.1.4 Técnica de Recolección de Datos	51
3.1.5 Análisis de Datos	52
4. Resultados	53
4.1 Análisis de las Características de la Fuente Eólica en el Departamento del Cesar.	53
4.2 Propuesta del Modelo de Aerogenerador de Uso Doméstico.	60
4.2.1 Selección de Materiales	60
4.2.2 Selección del Tipo de Aerogenerador	61
4.2.3 Selección del Sistema de Orientación	62
4.3 Diseño de un Prototipo del Aerogenerador en el Software SolidWorks según el Modelo Propuesto.	62
4.3.1 Dimensiones de las Piezas	62
4.3.2 Cálculo de la Potencia Eléctrica	65
4.3.3 Cálculo de la Presión del Viento.....	65
4.3.4 Cálculo de la Velocidad de Giro del Rotor	66
4.3.5 Fuerza a la que está Sometida el Rotor	68
4.3.6 Potencia Eléctrica Máxima	68
4.4 Evaluación de la Viabilidad del Prototipo mediante Simulación en el Software ANSYS.....	69
4.4.1 Análisis Estructural	69
4.4.2 Análisis de Flujo del Aire	77

Conclusiones	81
Recomendaciones	83
Referencias bibliográficas.....	84
Anexos	87

Índice de Tablas

Tabla 1. Cuadro de Operacionalización de Variables..... 48

Tabla 1. (Continuación) Cuadro de Operacionalización de Variables 49

Índice de Figuras

Figura 1. Capacidad de Generación Eólica instalada en 2019	21
Figura 2. Cobertura Energía Eléctrica Censo DANE 2005	23
Figura 3. (GW/H) producidos en Colombia a base del Viento para el año 2010	26
Figura 4. (GW/H) producidos en Colombia a base del Viento para el año 2019	27
Figura 5. Promedio Anual de las Velocidades del Viento en Colombia	28
Figura 6. Aerogenerador de Eje Horizontal	39
Figura 7. Aerogenerador de Eje Vertical	40
Figura 8. Escalas de Longitud consideradas para un Estudio de Viento	41
Figura 9. Partes de un Aerogenerador.....	42
Figura 10. Componentes Internos de un Aerogenerador	44
Figura 11. Velocidad Promedio del Viento a 10 metros de altura.....	45
Figura 12. Densidad del Aire en Colombia	54
Figura 13. Rosa de los Vientos en Colombia.....	56
Figura 14. Dirección del Viento en Colombia.....	57
Figura 15. Velocidad Promedio del Viento en Colombia.....	59
Figura 16. Base del Aerogenerador	62
Figura 17. Torre o Mástil.....	63
Figura 18. Góndola	63
Figura 19. Palas o Aspas.....	64
Figura 20. Buje.....	64
Figura 21. Veleta.....	64
Figura 22. Ensamble Final del Aerogenerador de Uso Doméstico.....	65

Figura 23. Coeficiente de Potencia en función de la Velocidad Específica	67
Figura 24. Mallado del Prototipo	70
Figura 25. Aplicación de Acero Comercial en la Base	71
Figura 26. Aplicación de Acero Comercial en la Torre	71
Figura 27. Aplicación del Aluminio en las Aspas	72
Figura 28. Aplicación del Aluminio en Góndola, Buje y Veleta.....	72
Figura 29. Sujeciones del Aerogenerador	73
Figura 30. Aplicación de la Presión del Viento en el Cesar	74
Figura 31. Deformación Total del Aerogenerador.....	75
Figura 32. Tensión en la Estructura	76
Figura 33. Factor de Seguridad.....	77
Figura 34. Cabina de Evaluación del Fluido.....	78
Figura 35. Aplicación de la Velocidad del Viento en el Cesar.....	79
Figura 36. Trayectoria del Fluido	79
Figura 37. Comportamiento de Flujo del Aire.....	80

Anexos

Anexo 1. Video explicativo del Análisis Estructural y de Flujo del Aire..... 87

Resumen

Título

Simulación de un Aerogenerador para Uso Doméstico en el Departamento del Cesar.

Autores

Adalis María Fábregas Peña y José Eduardo Márquez Ferreira.

Palabras clave

Aerogenerador, energía eólica, simulación, prototipo, departamento del Cesar.

Descripción

El presente proyecto tiene como objetivo principal simular un aerogenerador de uso doméstico para las zonas rurales de difícil acceso del Departamento del Cesar.

Metodológicamente, el tipo de investigación es cuantitativa, con diseño pseudo-experimental, dado que para simular el prototipo es necesario iniciar por una etapa de análisis de las características de la fuente eólica en las zonas rurales de difícil acceso y a partir de los datos, proponer el diseño de la turbina.

Luego, los investigadores proceden a complementar la información, profundizando sobre los tipos de aerogeneradores, los materiales más utilizados y la importancia del sistema de orientación, con el fin de seleccionar las propiedades adecuadas que permitan brindar eficiencia al modelo del aerogenerador de uso doméstico adecuado a las condiciones geográficas del Departamento del Cesar.

Posteriormente, mediante el software SolidWorks, el proyecto desarrolla las etapas de diseño de las piezas y ensamble de estas; dando forma estructural al producto del aerogenerador y determinando la potencia eléctrica máxima posible a producir.

Por último, la investigación emplea el programa de simulación ANSYS para ejecutar la evaluación de la viabilidad del prototipo diseñado mediante un análisis estructural de los materiales utilizados y un análisis de flujo del aire según las características eólicas identificadas en el Departamento del Cesar. De este modo, el presente proyecto ofrece una alternativa de solución ante la problemática de la generación de energía eléctrica que afecta a las zonas rurales aisladas del Departamento del Cesar, contribuyendo en la mejora de la calidad de vida de los habitantes, generando riquezas, empleos locales, y aportando al desarrollo sostenible de la sociedad.

Abstract

Title

A Domestic Wind Turbine Simulation for Domestic Use in the Department of Cesar.

Authors

Adalis María Fábregas Peña and José Eduardo Márquez Ferreira.

Keywords

Wind turbine, wind energy, simulation, prototype, department of Cesar.

Description

The main objective of this project is to simulate a wind turbine for domestic use in rural areas of difficult access in the Department of Cesar.

Methodologically, the type of research is quantitative, with a pseudo-experimental design, given that to simulate the prototype it is necessary to begin by analyzing the characteristics of the wind source in rural areas of difficult access and based on the data, propose the design of the turbine.

Then, the researchers proceed to complement the information, deepening on the types of wind turbines, the most used materials, and the importance of the orientation system, to select the appropriate properties that allow providing efficiency to the model of the wind turbine for domestic use suitable to the geographical conditions of the Department of Cesar.

Subsequently, using SolidWorks software, the project develops the design stages of the parts and their assembly, giving structural shape to the wind turbine product and determining the maximum possible electrical power to be produced.

Finally, the research uses the ANSYS simulation program to evaluate the viability of the designed prototype through a structural analysis of the materials used and an air flow analysis

according to the wind characteristics identified in the Department of Cesar. Thus, this project offers an alternative solution to the problem of electric power generation that affects isolated rural areas of the Department of Cesar, contributing to the improvement of the quality of life of the inhabitants, generating wealth, local jobs, and contributing to the sustainable development of society.

Introducción

En la actualidad, el viento es un recurso utilizado para generar electricidad debido que su implementación ha reducido sus costos durante los últimos años notablemente. Por consiguiente, las personas prefieren invertir en turbinas eólicas o aerogeneradores de uso doméstico, debido que estos permiten la generación de energía eléctrica mediante la utilización del viento, convirtiendo la energía cinética a mecánica y de ahí transformándola en corriente eléctrica.

Según datos de IRENA (2021) la generación de energía eléctrica con base en viento se duplicó entre 2009 y 2013, lo que aumento la demanda en proyectos destinados a esta fuente renovable. Asimismo, en 2016 la energía eólica representó el 16% de la energía eléctrica generada por fuentes alternativas, teniendo como principal beneficiaria aquella población que habita en las zonas rurales de difícil acceso.

Un estudio realizado por el DANE (2005) muestra que en Colombia existen 2'254.832 viviendas rurales que se encuentran habitadas, de las cuales el 2,3% corresponde al Departamento del Cesar. Por lo tanto, cabe mencionar que un 34,5% de estas viviendas no cuentan con cobertura de energía eléctrica, sufriendo efectos como inseguridad, falta de acceso a la educación, problemas de salud, deforestación por búsqueda de leña para calentar los hogares y contaminación del aire por quema de combustibles.

Por tal motivo, el presente proyecto desea aportar soluciones para ampliar la cobertura de energía eléctrica a sectores rurales del Departamento del Cesar, que por ausencia del servicio eléctrico en sus hogares no poseen la oportunidad de alcanzar mejores condiciones de vida y generar desarrollo en la actividad económica local.

El cumplimiento de esta idea será posible gracias a la energía eólica, porque como fuente alternativa principal permitirá la puesta en marcha del proyecto denominado *Simulación de un Aerogenerador para Uso Doméstico en el Departamento del Cesar*.

1. Problema de Investigación

1.1 Planteamiento del Problema

A continuación, se desarrolla el planteamiento del problema con el fin de describir y orientar el objeto de estudio de la presente investigación.

1.1.1 Identificación del Problema

El Departamento del Cesar hace parte de los 32 departamentos de Colombia y se encuentra situado en la zona nororiental del país. Su organización territorial se encuentra conformada por 25 municipios, y de acuerdo con la Gobernación del Cesar (2021) posee una extensión de 22.905 km² con una población de 1.041.203 habitantes (Gobernación del Cesar, 2021).

Según estudios realizados por el DANE (2005), las zonas rurales del Cesar están conformadas por 52.597 viviendas habitadas, de las cuales solamente 34.502 cuenta con un servicio de energía eléctrica, viéndose afectado así mismo, el resto de la población de estas diferentes áreas rurales de difícil acceso en el departamento del Cesar. De acuerdo con el análisis desarrollado en el Cesar, se logró observar que la principal causa del problema es que el 34% de los domicilios no cuentan con las coberturas deseadas que le permitan poseer la prestación del servicio eléctrico (DANE, 2005).

1.1.2 Descripción del Problema

El informe de los efectos socioeconómicos provocados por la Energía Eólica en el contexto de la transición energética publicado por Siemens Gamesa Renewable Energy (SGRE), menciona que alrededor del mundo existen mil millones de personas que no poseen electricidad y 2.700 millones que no tienen acceso a tecnologías limpias para su día a día (Siemens Gamesa Renewable Energy, 2019).

Por tal razón, la clave para mejorar el bienestar integral de los hogares está en implementar las energías renovables para producir energía eléctrica, lo cual se ve traducido en ahorros para las viviendas de los países menos desarrollados, especialmente para los más desfavorecidos, como lo son los habitantes de las zonas rurales aisladas.

De acuerdo a los estudios realizados por el Consejo Global de Energía Eólica (2019), China, Alemania, Estados Unidos, India y España se encuentran entre los primeros países con mayor capacidad de producción de corriente eléctrica mediante el recurso eólico. Esto se puede observar en la Figura 1.

Figura 1.

Capacidad de Generación Eólica instalada en 2019



Nota. Capacidad de generación eólica instalada a nivel global. Tomado del Consejo Global de Energía Eólica. 2019.

A partir del gráfico anterior, se infiere que las inversiones en proyectos a base de energía eólica compiten exitosamente alrededor del mundo, con el propósito de construir el camino hacia un futuro energético limpio.

Por otro lado, un informe publicado por la Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia (2015) establece que el Ministerio de Minas y Energía tiene el propósito de alcanzar un 6,5% de la capacidad instaurada para la producción de energía eléctrica a partir de fuentes alternativas, priorizando la energía eólica.

Con base a esto, se puede inferir que el porcentaje de utilización de este recurso es muy bajo, por lo cual, mediante este proyecto se busca aumentar ese valor a través del diseño de un aerogenerador con el fin de aportar a la problemática de bajo cubrimiento de las redes eléctricas en las diferentes zonas rurales de difícil acceso del Departamento del Cesar. Asimismo, el informe menciona que en esta región del país no se aprovechan de manera adecuada las fuentes de energía alternativas. Sin embargo, en el informe se identificó la energía eólica que posee el Cesar tiene un gran potencial que aporta grandes beneficios al departamento y lo posicionan como un área idónea para el desarrollo de proyectos en energías renovables, puesto que las velocidades del viento son iguales o superiores a 2 m/s. (IDEAM, 2017)

En la figura 2, se evidencia un censo realizado por el DANE (2005) donde se encuentra el porcentaje de las viviendas rurales en el Departamento del Cesar que cuentan con servicio de energía eléctrica:

Figura 2.*Cobertura Energía Eléctrica Censo DANE 2005*

Descripción	Un	Total Nacional	Departamento		Capital		Municipio		
			%	Cesar	%	Valledupar	San Juan del Cesar Cabecera y San Juan del Cesar Resto		
Cobertura urbana	Viviendas habitadas	Un	7.489.689	1,8%	138.395	47,4%	65.640	4.044	San Juan del Cesar Cabecera
	Viviendas con servicio de energía eléctrica	Un	7.368.652	1,8%	135.470	47,7%	64.610	3.927	
	Cobertura	%	98,4%		97,9%		98,4%	97,1%	
Cobertura rural	Viviendas habitadas	Un	2.254.832	2,3%	52.597	19,3%	10.173	1.967	San Juan del Cesar Resto
	Viviendas con servicio de energía eléctrica	Un	1.751.722	2,0%	34.502	17,5%	6.034	1.481	
	Cobertura	%	77,7%		65,6%		56,3%	75,30%	
Cobertura total	Viviendas habitadas	Un	9.741.335	1,96%	190.992	39,70%	75.813	6.011	San Juan del Cesar Cabecera y San Juan del Cesar Resto
	Viviendas con servicio de energía eléctrica	Un	9.119.078	1,86%	169.972	41,60%	70.644	5.408	
	Cobertura	%	93,6		89%		93,2%	90%	

Nota. Cobertura de energía eléctrica de las viviendas urbanas y rurales en el Departamento del Cesar. Tomado del DANE. 2005.

A partir de la información anterior, se infiere que la problemática radica en la mala planificación de las redes eléctricas por parte de las empresas que prestan este servicio hacia las zonas rurales, dejando un 34,4% de las viviendas sin cobertura de energía eléctrica (DANE, 2005). A causa de esto, las familias que habitan en las áreas aisladas del Departamento del Cesar se ven obligadas a buscar una forma de abastecer las necesidades de energía eléctrica que requieren mediante el uso de combustibles fósiles, provocando un impacto negativo al medio ambiente.

1.2 Formulación del Problema

¿Cómo la simulación de un aerogenerador modelaría la generación de corriente eléctrica para el consumo doméstico?

1.2.1 Sistematización del Problema

- ¿Cuáles son las características de la fuente eólica que se deben tener en cuenta para la ejecución del proyecto?
- ¿Cuáles son los factores adecuados para elaborar el aerogenerador de uso doméstico?
- ¿Cómo se puede generar un diseño asistido por computador de un aerogenerador?
- ¿Cómo se evaluará la viabilidad del prototipo del aerogenerador de uso doméstico?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo General

Simular un aerogenerador de uso doméstico para las zonas rurales de difícil acceso del Departamento del Cesar.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analizar las características de la fuente eólica en el Departamento Cesar.
- Proponer un modelo de un aerogenerador de uso doméstico.
- Diseñar un prototipo del aerogenerador en el software SolidWorks según el modelo propuesto.
- Evaluar la viabilidad del prototipo mediante una simulación en el software ANSYS.

1.4 Justificación

Los aerogeneradores de uso doméstico son un elemento fundamental para el aprovechamiento del recuso del viento, pues se encuentran diseñados con el fin de brindar un aporte extra de electricidad que permite reducir los consumos energéticos y en otras ocasiones, proporcionar corriente para el abastecimiento de una vivienda.

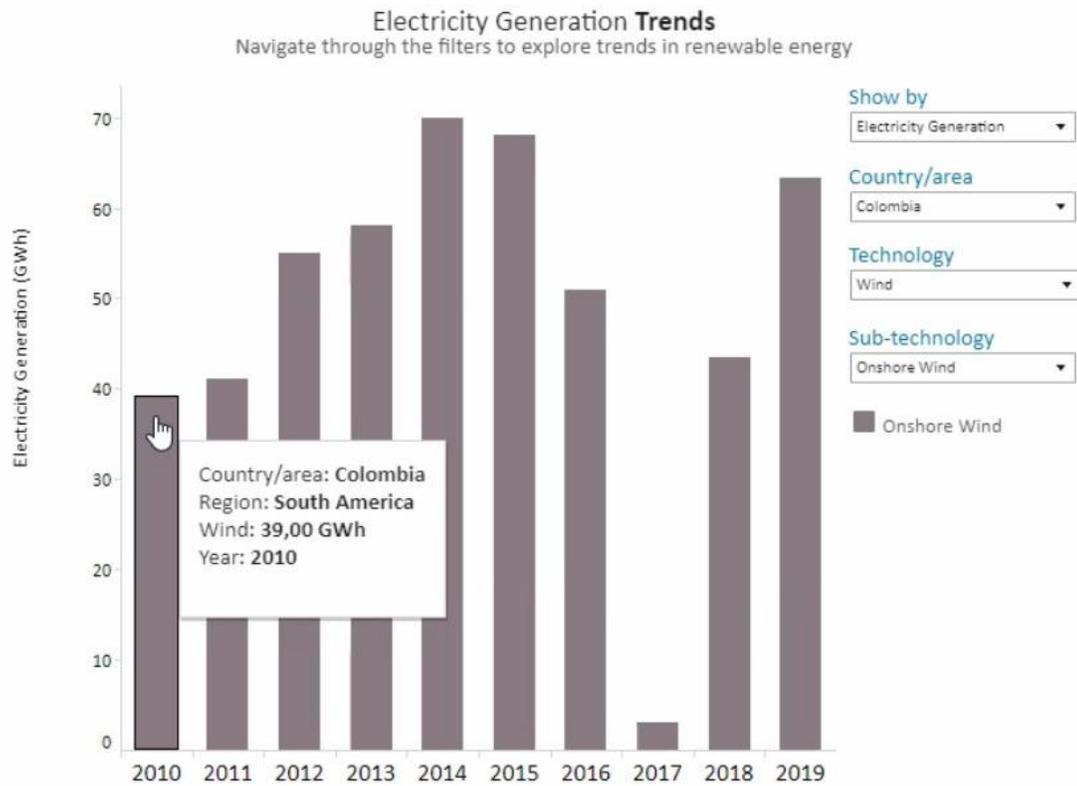
La Agencia Internacional de Energías Renovables por sus siglas en inglés (IRENA), es una organización intergubernamental que tiene como objetivo principal apoyar a los países en la transición hacia un futuro energético sostenible a base de las energías renovables. IRENA (2021), se encarga de promover “la adopción generalizada y el uso sostenible de todas las formas de energías alternativas, incluida la bioenergía, geotermia, energía hidroeléctrica, oceánica, solar y eólica, con la finalidad mantener un desarrollo sostenible, el acceso a la energía, la seguridad energética, el crecimiento económico y la prosperidad ambiental con bajas emisiones de carbono”.

Un estudio realizado por IRENA (2016), menciona que la producción de energía eólica supuso un 6% de la electricidad generada por las fuentes renovables, destacando que los mejores lugares para captar las corrientes de viento y generar electricidad son las zonas remotas. Por tal razón, los proyectos eólicos son una alternativa de desarrollo ambiental, que contribuyen a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, optimizando los recursos naturales y respetando el medio ambiente de manera simultánea, para brindar beneficios a los habitantes de las zonas rurales aisladas del país, generando conciencia ambiental, nuevas oportunidades de empleos y mejores condiciones de vida.

A continuación, en la figura 3 se observan los gigavatios por hora (GW/H) producidos en Colombia a base del viento para el año 2010, en comparación con los del año 2019 (Figura 4).

Figura 3.

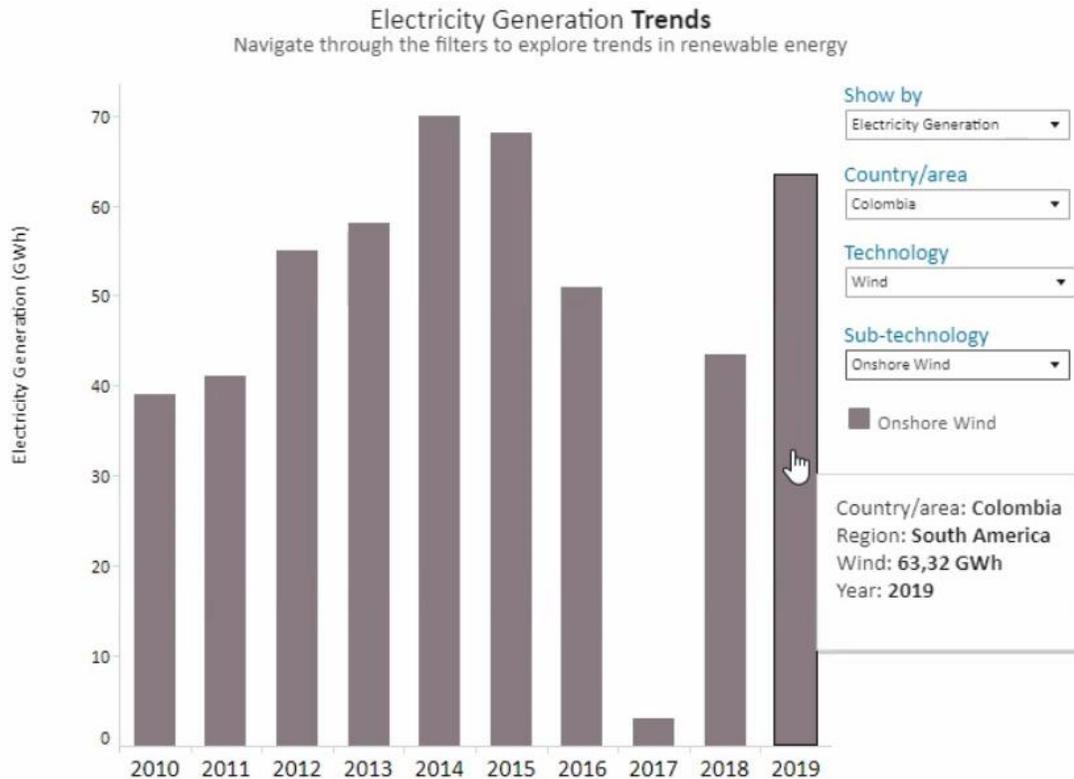
(GW/H) producidos en Colombia a base del Viento para el año 2010



Nota. Gigavatios por hora producidos en Colombia a base del viento. Tomado de IRENA. 2010.

Figura 4.

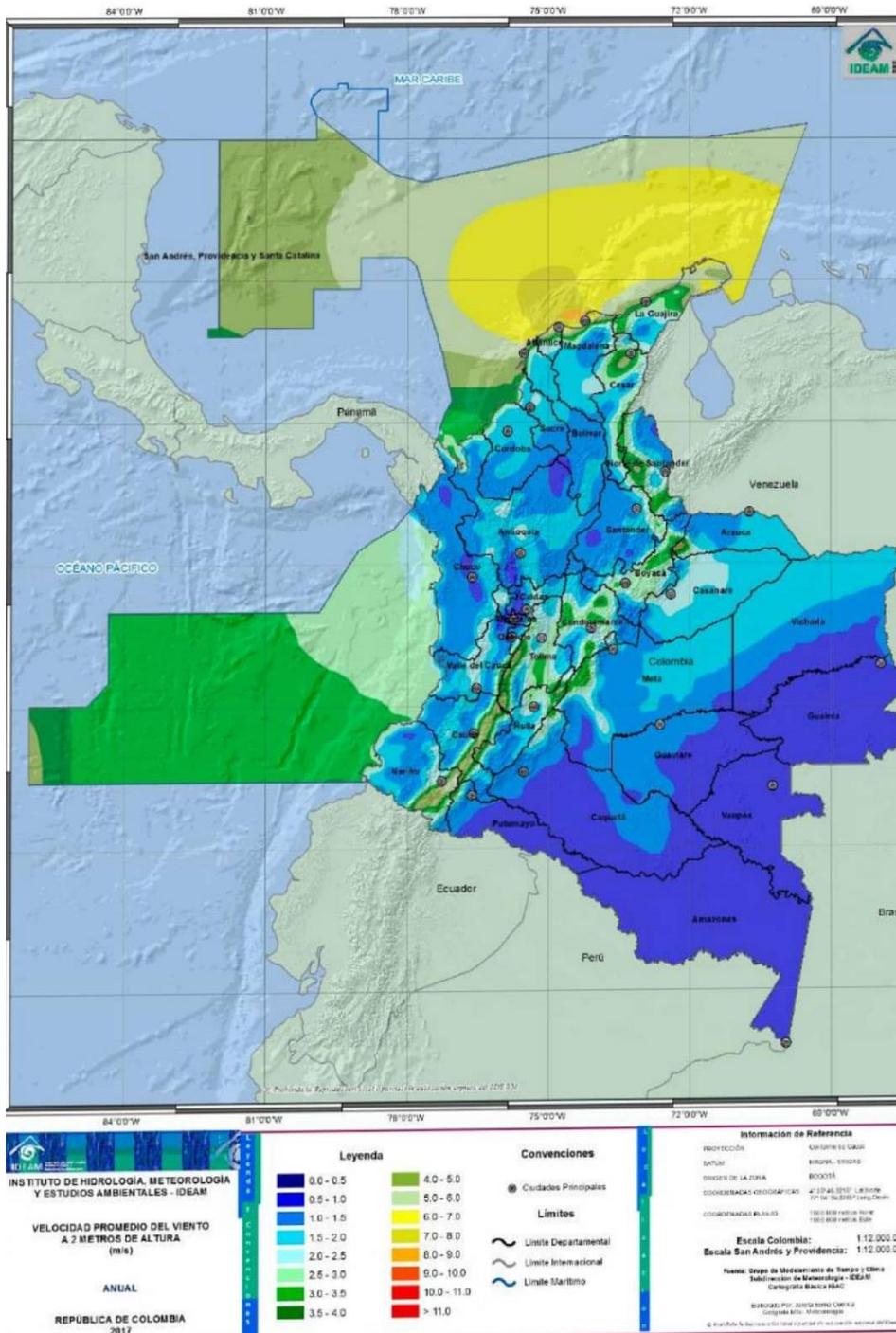
(GW/H) producidos en Colombia a base del Viento para el año 2019



Nota. Gigavatios por hora producidos en Colombia a base del viento. Tomado de IRENA. 2019.

A partir de los gráficos anteriores, se evidencia un constante crecimiento del recurso eólico en Colombia, lo que significa que las inversiones en los proyectos que empleen esta energía alternativa son directamente proporcionales con el desarrollo de las tecnologías implementadas, pues la sencillez y eficiencia de los aerogeneradores de uso doméstico permiten producir electricidad con velocidades de arranque hasta de 2m/s (IDEAM, 2017).

Adicionalmente, el IDEAM (2017) menciona en un reporte estadístico que, a 2 m de altura con respecto al suelo, el promedio anual de las velocidades del viento que son iguales o superiores a 2 m/s, y se presentan generalmente, sobre el área montañosa de las cordilleras Central y Oriental, norte del Cesar y Sierra Nevada de Santa Marta. (Ver figura 5)

Figura 5.*Promedio Anual de las Velocidades del Viento en Colombia*

Nota. Promedio anual de las velocidades del viento en Colombia a 2 metros de altura con respecto al suelo. Tomado del IDEAM. 2017.

El cumplimiento de esta idea será posible gracias a la energía eólica, porque esta proporciona beneficios importantes para la sociedad, resaltando ventajas como ser una fuente renovable e inagotable que genera riquezas, empleos locales y contribuye al desarrollo sostenible de la sociedad. Por consiguiente, el presente proyecto caracteriza la fuente de energía eólica para zonas rurales de difícil acceso del Departamento del Cesar, de modo que este estudio permita la simulación de un modelo de un aerogenerador eléctrico de uso doméstico, con la finalidad de brindar un mejor estilo de vida a las personas que habitan en las áreas aisladas del departamento, suministrándoles soluciones oportunas a esas comunidades vulnerables y del mismo modo, promoviendo el cuidado del medio ambiente.

A continuación, se enfatiza en el aspecto teórico, metodológico, social y práctico del proyecto denominado *Simulación de un Aerogenerador para Uso Doméstico en el Departamento del Cesar*.

1.4.1 Teórico

El presente proyecto se soporta en los conceptos del libro *Ingeniería de la Energía Eólica* de Villarubia (2012), con el propósito de desarrollar los objetivos establecidos, pues esta referencia bibliográfica aborda información que permite caracterizar la fuente del viento y seleccionar los factores adecuados para establecer una propuesta del modelo del aerogenerador a diseñar.

1.4.2 Metodológico

El enfoque metodológico dado a este proyecto para abarcar la totalidad de los objetivos propuestos es de tipo cuantitativo con base teórica, pues es necesaria la recolección de datos estadísticos sobre el comportamiento del viento en el Departamento del Cesar generados por el IDEAM. Además del uso de los softwares de simulación como SolidWorks y ANSYS, para

obtener una serie de resultados por medio de gráficas, cuadros y otros aspectos numéricos que permiten inferir la viabilidad del prototipo simulado.

1.4.3 Social

La presente investigación, busca generar conciencia en el gobierno local o entes privados para desarrollar este tipo de proyectos, contribuyendo en la mejora de la calidad de vida de los habitantes de las zonas rurales de difícil acceso y en el desarrollo económico de las mismas, permitiendo a su vez un impacto económico positivo en el Departamento del Cesar.

1.4.4 Práctico

El desarrollo de esta investigación busca lograr la simulación de un aerogenerador de uso doméstico, para optar por el título académico de ingeniero industrial. Además, brindar una base teórica para futuros proyectos de energías alternativas en el Departamento del Cesar.

Para la ejecución de este proyecto fue necesario aplicar los siguientes conocimientos dentro del marco de la ingeniería industrial:

- Metodología de la Investigación
- Dibujo de Ingeniería
- Ciencia de los Materiales
- Formulación y Evaluación de Proyectos
- Energías Alternativas
- Razonamiento Cuantitativo
- Simulación de Procesos Industriales
- Estadística Inferencial

1.5 Delimitación de la Investigación

1.5.1 Espacial

El presente proyecto se desarrollará en la ciudad de Valledupar, Departamento del Cesar, tomando como referencia las zonas rurales aledañas de difícil acceso.

1.5.2 Temporal

El tiempo necesario para la realización de este proyecto está comprendido desde octubre de 2020 hasta enero de 2022.

1.5.3 Teórica

La presente investigación se encontrará respaldada por conceptos de Villarrubia (2012), quien es el autor del libro titulado *Ingeniería de la Energía Eólica*. Asimismo, se tendrán en cuenta los datos eólicos del Cesar suministrados por la entidad gubernamental IDEAM (2021), y los censos realizados por el DANE (2005), correspondientes a las coberturas de la energía eléctrica en las zonas rurales de difícil acceso del departamento del Cesar.

1.5.4 Institucional

El proyecto de investigación se desarrolla en el programa de Ingeniería Industrial adscrito a la Universidad de Santander UDES y pertenece al grupo de Nuevas Tecnologías UDES, en la línea de investigación sobre Energías Alternativas.

2. Marco Teórico

2.1 Antecedentes

En esta sección, se exponen los antecedentes más relevantes teniendo en cuenta el problema de estudio planteado. Estos permitieron analizar el contexto de la energía eólica en Colombia y las diferentes propuestas de aerogeneradores eólicos como guía para la selección del modelo a ejecutar.

Arratia et al. (2017) trabajaron en un artículo denominado “Propuesta de abastecimiento energético en forma independiente para una vivienda rural basada en un aerogenerador” planteando como objetivo principal la selección de un modelo de baja potencia según la estimación de la demanda energética diaria y el análisis del recurso eólico de una zona rural de difícil acceso en Argentina.

En la metodología fue necesario realizar un análisis del recurso eólico a través de mediciones periódicas de elementos como la velocidad y dirección del viento, esto fue posible gracias a la implementación de una estación meteorológica ubicada en el lugar donde se desarrolló el proyecto. Los datos obtenidos fueron procesados con el fin de calcular el potencial eólico de la zona y a partir de esto, seleccionar un aerogenerador de baja potencia capaz de satisfacer las necesidades de consumo básicas de una vivienda.

En conclusión, el estudio realizado fue factible para la instalación del aerogenerador, pues según los análisis concretados se logra cumplir con una parte de la demanda diaria de la vivienda. Motivo por el cual, se decidió complementar posteriormente este dispositivo eólico con un equipo fotovoltaico para lograr un mayor rendimiento.

Este artículo permitió comprender la importancia de complementar diferentes energías alternativas para generar la misma finalidad, que en este caso es el ahorro de la energía eléctrica en las viviendas.

Por otra parte, Contreras y Rodriguez. (2016) trabajaron en un artículo llamado “Incentivos a la inversión en energía eólica en Colombia” planteando como objetivo principal una política enfocada en incrementar la cobertura eléctrica en aquellas áreas remotas del país que tienen fuertes vientos para desarrollar inversiones en generación limpia brindando un beneficio para los usuarios de bajos ingresos y, del mismo modo promover el empleo local desde las energías alternativas.

La metodología de este proyecto se enfoca en desarrollar una medida política-energética para la fuente eólica en Colombia, esta fue planteada a nivel descentralizado, abarcando principalmente aquellas zonas rurales aisladas del país, donde la cobertura eléctrica se encuentra por debajo del 12% y la velocidad del viento es apta para la generación de electricidad.

Por tal motivo, los autores proponen un mecanismo para financiar este tipo de inversiones público-privadas, diseñando un método de programación bi-nivel, obteniendo como resultado la ejecución del proyecto con una asignación de recursos elaborada de forma eficaz y eficiente.

Este artículo permitió comprender la importancia de la velocidad del viento en las zonas rurales de difícil acceso para la generación de energía eléctrica, asimismo, recolectar y analizar los datos necesarios para realizar un estudio de mercado, con el fin de observar la viabilidad comercial de un aerogenerador de uso doméstico.

En el mismo orden de ideas, Molina. (2016) realizó un proyecto denominado “Diseño de un aerogenerador que permita generar energía eléctrica en el colegio Ofelia Uribe de Acosta,

comunidad de Yomasa’’ con el objetivo de abastecer la demanda energética de esta institución educativa.

En la metodología fue necesario realizar un recorrido técnico previo para la identificación de la zona donde se ejecutaría el levantamiento topográfico, estudiando el terreno a través de dos puntos llamados delta 1 y delta 2 que brindaron la información necesaria para la posterior construcción del prototipo en dicha área.

La autora describe de igual manera, cuáles fueron los elementos necesarios para la fabricación de un molino de viento de uso doméstico, en estos se ven involucrados el mantenimiento, el tipo de material y la estructura para la construcción de un prototipo de aerogenerador de eje vertical tipo Savonius.

El proyecto dio solución a la problemática que se presentaba en el colegio por la falta de corriente eléctrica, debido a que los estudios realizados a las condiciones ambientales favorecieron la instalación del aerogenerador en el área seleccionada.

Este proyecto permitió comprender qué tipo de aerogenerador sería el adecuado para abastecer la demanda de energía eléctrica a los habitantes de la zona rural de difícil acceso del departamento del Cesar y los materiales necesarios para el diseño de este.

Por su parte, Buelvas, Valencia, y Vanegas (2017) efectuaron un ‘‘Estudio estadístico de la velocidad y la dirección del viento en los departamentos de Atlántico y Bolívar en Colombia’’ con el objetivo de identificar la posibilidad de abastecer la demanda energética de la región Caribe a partir de parques eólicos.

La metodología se encuentra basada en la descripción y recolección de datos en la región caribe, así como también la utilización de herramientas estadísticas para la obtención de

información valiosa que permitiera analizar las velocidades del viento en cada estación meteorológica de los departamentos mencionados anteriormente.

Como resultado de este estudio, se evidenció el comportamiento de las diferentes corrientes y direcciones originadas por el viento en estas áreas de Colombia para la producción de la energía eólica. Este artículo permitió identificar el comportamiento de las principales características del viento que deben ser tenidas en cuenta al momento de ejecutar un proyecto a base de la energía eólica.

En el mismo orden de ideas, Mejía et al. (2006) desarrollaron un artículo titulado “Simulación de producción de energía eólica en Guajira, Colombia”, cuyo objetivo fue diseñar una simulación para conocer el nivel de producción de energía eléctrica en esta región del país.

La metodología utilizada se aborda mediante el uso de ecuaciones de conservación de momento axial y angular, teoría de elementos de pala y procesos de optimización, permitiendo estudiar la distribución apropiada de la superficie de la cuerda aerodinámica y la torsión de las palas de acuerdo con el radio de los molinos de viento generadores de corriente eléctrica.

Los resultados de esta simulación fueron posibles gracias a los datos recopilados en la región de la Guajira sobre la distribución de las probabilidades de la velocidad del viento en esta zona del país. Este artículo permitió comprender cómo se emplea una metodología para elegir la cantidad de palas adecuadas para el diseño de un aerogenerador de gran escala teniendo en cuenta la distribución de la superficie de la cuerda aerodinámica.

Por otro lado, Vargas, García, y Krejci (2019) se encargaron de realizar un “Estudio de prefactibilidad de sistemas eólicos y solares para el autoabastecimiento residencial en 4 localidades urbanas de Colombia: Implicación de nuevos incentivos incluidos en la Ley 1715”, con el objetivo de comprobar si la combinación de un sistema eólico de pequeña escala y un

sistema solar fotovoltaico son necesarios para la autosuficiencia de la energía eléctrica de una sola vivienda.

La metodología implementada por los autores fue una turbina de pequeña escala para producir 3,5 KW de energía, esta se ubicó en una estación meteorológica elaborada en la Universidad Antonio Nariño con el fin de obtener datos que permitieran elaborar un análisis respecto a la velocidad y dirección del viento.

En las conclusiones de la investigación se evidenció que el sistema eólico no logró alcanzar un resultado financiero deseable de la inversión efectuada, debido a que la ubicación de las diferentes viviendas arrojó resultados negativos en cuanto a las condiciones del recurso del viento necesarias para el proyecto. Este artículo permitió conocer cuáles son las implicaciones de los incentivos incluidos en la Ley 1715, que deben ser tenidos en cuenta para la implementación de proyectos de energías alternativas tanto en zonas urbanas como rurales aisladas.

Sumando a esto, Guerrero, Vélez, y Morales (2018) desarrollaron un artículo denominado “Energía eólica y territorio: sistemas de información geográfica y métodos de decisión multicriterio en la Guajira (Colombia)”, con el objetivo de encontrar la ubicación óptima para instalar parques eólicos en el Departamento de la Guajira.

La metodología propuesta por los autores se desarrolló para identificar y evaluar zonas con potencial eólico en Colombia, mediante criterios ambientales, técnicos y económicos que fueron establecidos con el fin de crear mapas de zonas restringidas y valoradas en el Departamento de la Guajira.

Gracias a estas herramientas de apoyo, se demostró el crecimiento de las energías alternativas en la última década en el país colombiano mediante el estudio de los porcentajes del

área total del Departamento de la Guajira y resultados positivos en las zonas disponibles por cada municipio para el desarrollo de proyectos de energía eólica.

Este artículo permitió identificar que existe un gran potencial eólico en Colombia, principalmente en la región Caribe. Asimismo, se determinó el análisis que debe ser tenido en cuenta para proyectos eólicos, con el objetivo de suplir la demanda energética de viviendas ubicadas en las zonas rurales de difícil acceso del Departamento del Cesar.

Finalmente, los antecedentes permiten concluir que la energía eólica ha evolucionado como alternativa para la producción de corriente eléctrica a nivel internacional, nacional y local. Por tal motivo, los proyectos que tienen como base fundamental el recurso del viento, prometen desarrollo ambiental, social, y económico, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de las personas que habitan en las zonas rurales aisladas del departamento del Cesar, o en su defecto de diferentes partes del país.

2.2 Bases Teóricas

A continuación, se presentan las bases teóricas de la presente investigación con el fin de definir los aspectos generales de la temática del proyecto.

2.2.1 Energía Eólica

RAE (2021) define el término eólico “pertenciente o relativo a Eolo, Dios de los vientos y padre del pueblo eólico en la mitología griega” (p.6)

Por otro lado, Factorenergía (2018) expone la energía eólica como un “tipo de energía cinética producida por el efecto de las corrientes de aire. Esta fuente renovable, reduce el uso de combustibles fósiles proveniente de las emisiones de efecto invernadero que causan el calentamiento global y puede ser convertida en electricidad a través de la implementación de aerogeneradores eólicos”.

En el mismo sentido, Villarubia (2012) menciona que en la última década “la energía eólica ha permitido progresar significativamente aspectos tales como: la gestión y mantenimiento de parques eólicos, la integración de la energía eléctrica en la red, la versatilidad y adaptación del diseño de aerogeneradores a las características específicas de los emplazamientos, la regulación y control de los mismos, la predicción de producción a corto plazo y la economía de escala con aerogeneradores de mayor potencia con una mejora en los costes unitarios de inversión y de producción eléctrica”.

2.2.2 Aerogeneradores

Acciona (2021) menciona que un aerogenerador es “un dispositivo que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica. Las palas de un aerogenerador giran entre 13 y 20 revoluciones por minuto, según su tecnología; teniendo en cuenta que la velocidad del rotor (fija o variable), varía en función a la velocidad del viento para alcanzar una mayor eficiencia”.

De la misma manera, la Asociación Empresarial Eólica (2011) define a los aerogeneradores como “máquinas empleadas para transformar la fuerza del viento en electricidad, que resultan muy útiles para disponer de corriente eléctrica en lugares aislados, ayudando a mejorar las condiciones de vida de las zonas rurales”.

2.2.3 Tipos de Aerogeneradores

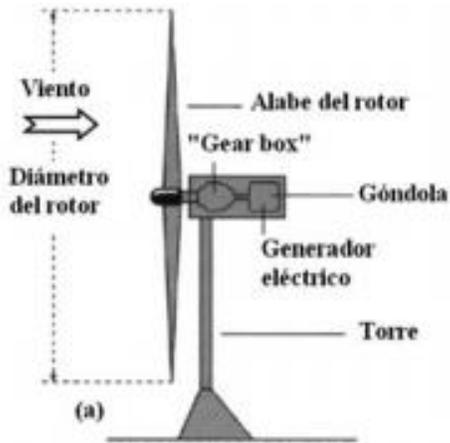
Villarubia (2012) define en su libro “Ingeniería de la energía eólica” dos tipos de aerogeneradores que se clasifican según la disposición del eje de giro en horizontal y vertical.

Aerogeneradores de Eje Horizontal. Son generadores con eje de rotación paralelo a la dirección del viento, tal como se observa en la Figura 6. Este tipo de turbinas también se conoce por sus siglas en inglés HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbine*), y es utilizado comúnmente para la producción de energía eléctrica.

Los aerogeneradores de eje horizontal tienen como principal ventaja la producción de un mayor coeficiente de potencia (C_p) y el buen aprovechamiento en el incremento de la velocidad del viento por la mayor elevación respecto al suelo.

Figura 6.

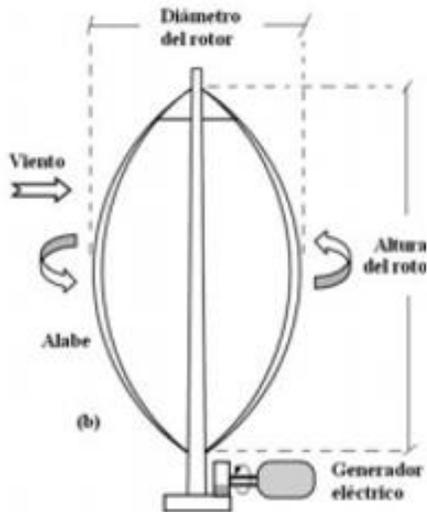
Aerogenerador de Eje Horizontal



Nota. Representación gráfica de un aerogenerador de eje horizontal. Tomado del libro Ingeniería de la energía eólica. 2012.

Aerogeneradores de Eje Vertical. Son turbinas con eje de rotación perpendicular a la dirección del viento. Este tipo de aerogeneradores se denominan VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*), generalmente son poco utilizados para proyectos eólicos; sin embargo, los más conocidos son el Savonius, con un funcionamiento similar al de un anemómetro de copas y el Darrieus, el cual posee unas aspas curvadas. Este último se puede observar en la Figura 7.

Los aerogeneradores de eje vertical presentan como ventaja más relevante una simetría vertical que ayuda al dispositivo a no requerir sistemas de orientación, una mejor accesibilidad permitiendo facilitar las tareas de mantenimiento, y no requerir mecanismos de cambio de paso.

Figura 7.*Aerogenerador de Eje Vertical*

Nota. Representación gráfica de un aerogenerador de eje vertical. Tomado del libro Ingeniería de la energía eólica. 2012.

2.2.4 Energía Eólica en Colombia

Según el artículo “El futuro prometedor de la energía eólica en Colombia y el mundo” publicado por Banco Davivienda S.A (2020) se menciona que el país posee un enorme potencial para la implementación de proyectos de energías alternativas, debido a sus características geográficas y diferentes pisos térmicos, los cuales permiten contar con niveles de radiación solar constantes durante todo el año en algunas regiones y del mismo modo, corrientes de viento idóneas para la generación de energía eólica.

También se plantea que es evidente que el sector de energías renovables tiene un gran potencial para explotar en el país. La inmersión en proyectos verdes resulta muy beneficiosa tanto para Colombia como para los inversionistas dado que, al hacerse más eficiente la producción de electricidad por medio de energía eólica, se genera riqueza y, además, se contribuye al desarrollo sostenible del país.

2.3 Marco Conceptual

A continuación, se desarrolla el marco conceptual con el fin de exponer los conceptos fundamentales para el desarrollo del presente proyecto de investigación.

2.3.1 Generación de la Energía Eólica

La energía eólica se obtiene a través de la energía cinética del viento, este último se debe a las diferencias densidades y presiones en la atmósfera que son provocadas por los cambios de temperatura y son las causas de los movimientos másicos de aire.

En el libro ‘‘Ingeniería de la energía eólica’’ Villarubia (2012) plantea las escalas de longitud que deben ser consideradas para el aprovechamiento energético del recurso eólico.

Figura 8.

Escalas de Longitud consideradas para un Estudio de Viento

Escala	Dimensiones (km)	Ejemplos
Planetaria	5.000	Celda de Hadley
Macroescala o Sinóptica	1.000	Ciclones de latitudes medias
Mesoescala	100	Tormentas y Brisas
Microescala	5 - 10	Turbulencias

Nota. Escalas de longitud que deben ser consideradas para el aprovechamiento energético del viento. Tomado del libro Ingeniería de la energía eólica. 2012.

2.3.2 Partes de un Aerogenerador

De acuerdo con el video interactivo que proporciona la página de Acciona (2021) es posible describir los principales componentes que conforman un aerogenerador:

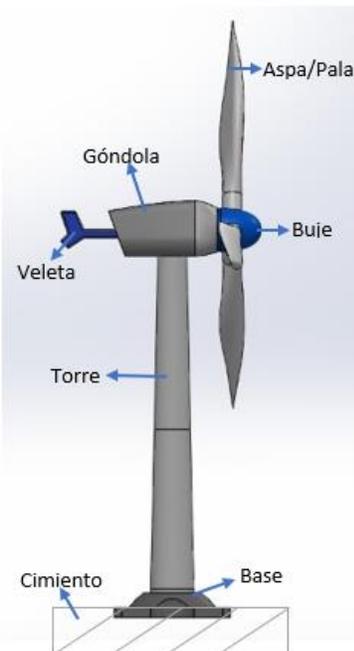
- **Cimiento:** garantiza la integridad del aerogenerador mientras lo sujeta en el suelo.
- **Veleta:** indica la dirección del viento, permite que el aerogenerador se oriente girando sobre la torre y se encuentra unida a la góndola.

- **Góndola:** es la encargada de proteger los componentes internos de la parte superior del aerogenerador, en donde se encuentran la multiplicadora, el generador eléctrico y el freno de disco.
- **Palas/Aspas:** captan la energía cinética del viento girando sobre su propio eje y transmite su potencia hacia el buje.
- **Buje:** es el elemento que une las palas con el sistema de rotación, el cual inicia por el eje lento.
- **Torre:** tiene la función de sujetar y brindarle altura a la parte superior del aerogenerador.
- **Base:** permite sujetar con firmeza el aerogenerador con el cemento.

En la figura 9, se observan las partes del aerogenerador definidas anteriormente.

Figura 9.

Partes de un Aerogenerador



Nota. Partes de un aerogenerador de eje horizontal. 2021.

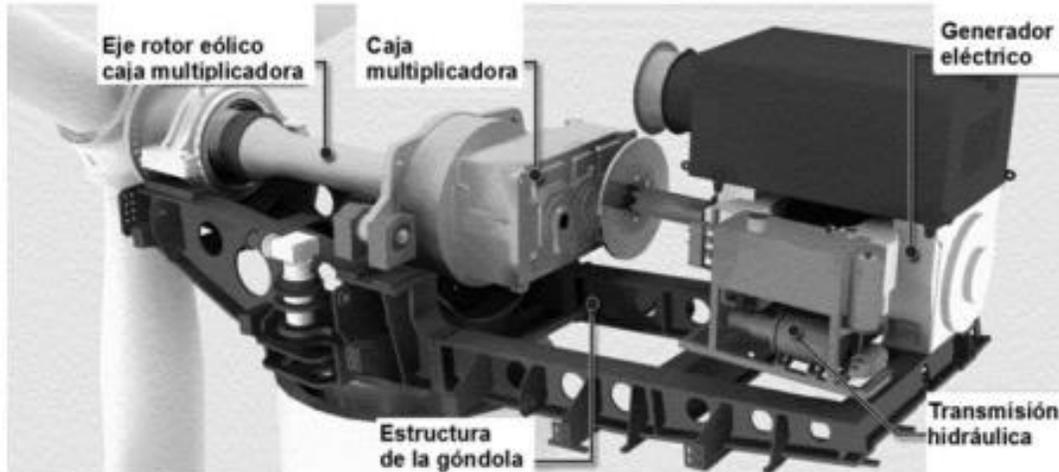
Asimismo, el video interactivo que proporciona la página de Acciona (2021) permitió identificar los componentes internos de un aerogenerador, los cuales son los siguientes:

- **Rotor:** se encuentra compuesto por las palas y el buje, es el elemento del aerogenerador que recibe la energía cinética, normalmente está constituido por tres palas.
- **Freno de disco:** se encarga de frenar la rotación de las aspas en caso de ser necesario debido al exceso de velocidad provocada en las mismas.
- **Eje lento:** conecta el buje con la multiplicadora, transmitiendo la energía que es captada por las palas.
- **Multiplicadora:** permite aumentar la velocidad en la que gira el eje lento, transfiriendo la misma hacia el eje rápido, con la finalidad de accionar el generador.
- **Eje rápido:** se encarga de transmitir la energía mecánica para accionar el generador eléctrico.
- **Generador:** convierte la energía mecánica de rotación cedida por la multiplicadora en energía eléctrica. Este elemento debe trabajar bajo niveles de cargas fluctuantes debido a las variaciones en la velocidad del viento.
- **Transformador:** es utilizado para mantener la frecuencia de la corriente, el voltaje y la potencia que son recibidas.

En la figura 10, se observan las partes internas del aerogenerador definidas anteriormente.

Figura 10.

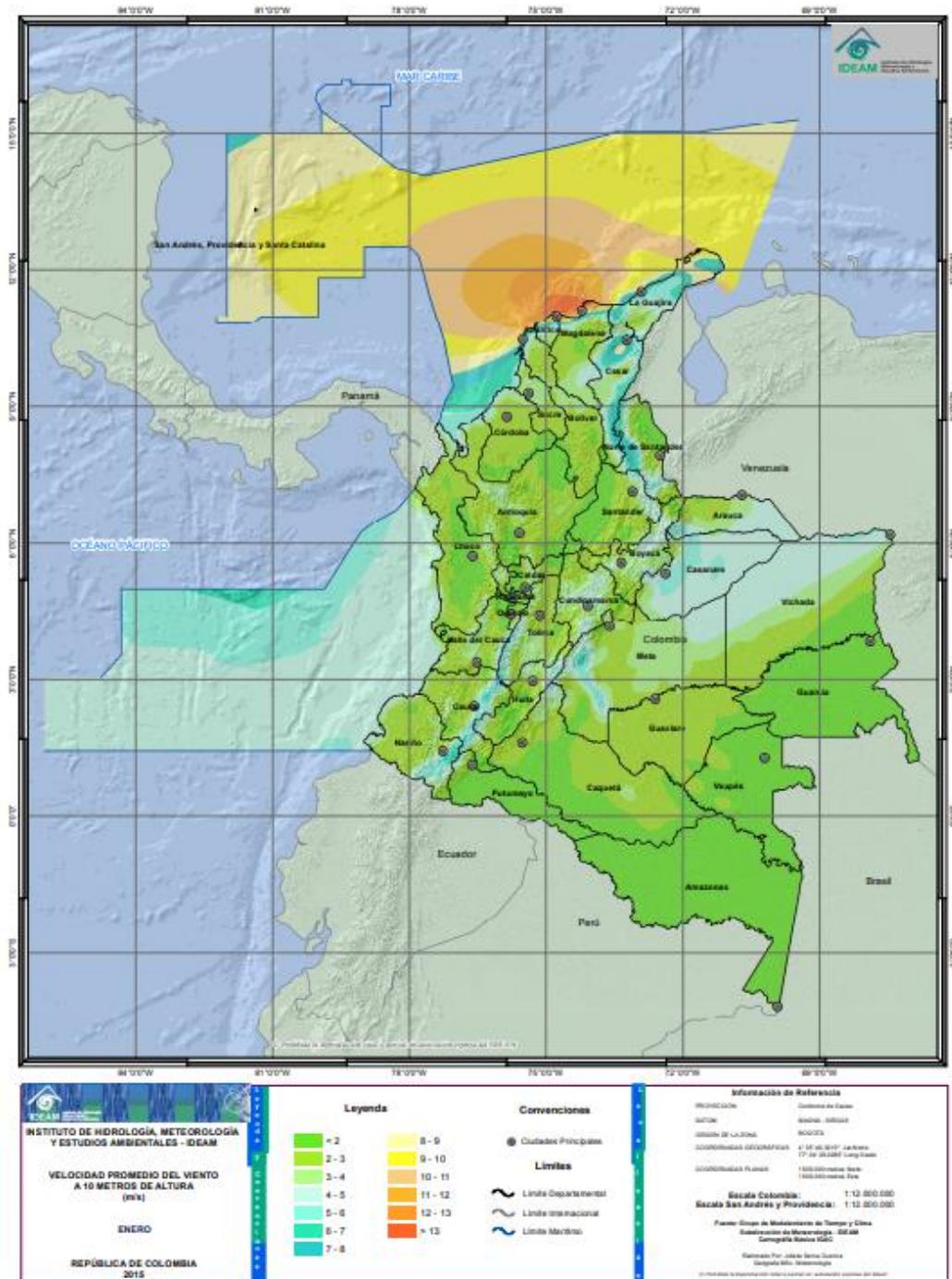
Componentes Internos de un Aerogenerador



Nota. Componentes internos de un aerogenerador de eje horizontal. Tomado del libro Ingeniería de la energía eólica. 2012.

2.3.3 Condiciones del Viento en el Cesar

A continuación, en la figura 11 se evidencia el atlas interactivo de Colombia tomado del IDEAM (2015) que corresponde a la velocidad promedio del viento a 10 metros de altura.

Figura 11.*Velocidad Promedio del Viento a 10 metros de altura.*

Nota. Velocidad promedio del viento a 10 metros de altura respecto al suelo. Tomado del IDEAM, 2015.

Teniendo en cuenta la información que presenta la página web del IDEAM y los colores parametrizados del mapa interactivo, es posible inferir que en el Departamento del Cesar las condiciones del viento son adecuadas para implementar proyectos de energía eólica, debido que la velocidad promedio del viento se encuentra entre 2 a 8 m/s, siendo predominante esta característica en la zona norte del departamento. (IDEAM, 2017)

2.4 Definición Nominal de la Variable

A continuación, se presenta la definición nominal de la variable definida para el presente proyecto de investigación.

2.4.1 Conversión de la Energía Eólica a Energía Eléctrica

La Asociación Empresarial Eólica (2021) define a la energía eólica como “una fuente alternativa limpia e inagotable, encargada de generar electricidad mediante la utilización de la energía cinética producida por efecto de las corrientes de aire”. Por lo tanto, la energía cinética es la variable fundamental que debe ser tomada en cuenta para comprender el proceso de transformación de energía eólica a energía eléctrica.

En este sentido, Acciona (2021) explica la conversión de estas energías de la siguiente manera:

Inicialmente, el aerogenerador es orientado automáticamente por medio de la veleta que se encuentra ubicada en la parte superior del mismo, permitiendo que el aparato aproveche al máximo la energía cinética del viento.

Luego, la energía del viento que fue captada hace girar las palas con velocidades de viento de unos 3,5 m/s y proporcionan la máxima potencia con unos 11 m/s. En el caso que existan corrientes de viento muy fuertes de 25 m/s, las palas se colocan en bandera y el aerogenerador se frena para evitar tensiones excesivas, daños o accidentes. (Acciona, 2021)

El rotor conformado por el conjunto de palas conectadas al buje permite girar un eje lento que se encuentra conectado a una multiplicadora, esta última posee la función de elevar la velocidad de giro desde unas 13 a unas 1.500 revoluciones por minuto. (Acciona, 2021)

Del mismo modo, la multiplicadora se encuentra conectada al eje rápido, el cual transfiere la energía mecánica recibida hacia el generador que produce la electricidad.

Finalmente, la energía eléctrica producida es conducida por el interior de la torre hasta la base y, desde allí, por línea subterránea hasta la subestación de servicio eléctrico, donde se eleva su tensión para ser inyectada a las redes eléctricas y distribuida a los diferentes puntos de consumo.

2.4.2 Cuadro de Operacionalización de Variables

Tabla 1.

Cuadro de Operacionalización de Variables

Título	Simulación de un Aerogenerador para Uso Doméstico en el Departamento del Cesar		
Objetivo general	Simular un aerogenerador de uso doméstico para las zonas rurales de difícil acceso del Departamento del Cesar		
Objetivos específicos	Variable	Dimensiones	Bibliografía
Analizar las características de la fuente eólica en el Departamento Cesar.	Conversión de la energía eólica a energía eléctrica.	Geografía	(Gobernación del Cesar, 2021)
Proponer un modelo de un aerogenerador de uso doméstico.		Comportamiento de los vientos	(IDEAM, 2021) (IRENA, 2021) (IDEAM, 2017)
		Aerogenerador Vertical	(Acciona, 2021) (Rolffot, 2014) (Villarrubia, 2012)
		Aerogenerador Horizontal	(Acciona, 2021) (Rolffot, 2014) (Villarrubia, 2012)
Diseñar en el software SolidWorks un prototipo del aerogenerador según el modelo propuesto.		Diseño estructural del modelo	(Molina, 2016) (Vargas, García, & Krejci, 2019) (Villarrubia, 2012)
		Propuesta funcional del modelo	(Molina, 2016) (Vargas, García, & Krejci, 2019) (Villarrubia, 2012)

Tabla 2. (Continuación)*Cuadro de Operacionalización de Variables*

Título	Simulación de un Aerogenerador para Uso Doméstico en el Departamento del Cesar		
Objetivo general	Simular un aerogenerador de uso doméstico para las zonas rurales de difícil acceso del Departamento del Cesar		
Objetivos específicos	Variable	Dimensiones	Bibliografía
Evaluar la viabilidad del prototipo mediante una simulación en el software ANSYS.	Conversión de la energía eólica a energía eléctrica	Pruebas estructurales y materiales del modelo	Resultado del proyecto
		Pruebas funcionales a partir de la simulación	Resultado del proyecto

Nota. La presente tabla permite observar la variable objeto y las dimensiones de la investigación. 2022.

3. Metodología de la Investigación

3.1 Marco Metodológico de la Investigación

En el presente capítulo se establecerán los métodos y técnicas necesarias que permiten obtener la información requerida para el análisis y el desarrollo de los objetivos planteados en el proyecto.

3.1.1 Tipo de Investigación

En el enfoque de investigación cuantitativo, “el saber científico se caracteriza por ser racional, objetivo, se basa en lo observable, en lo manipulable y verificable” (Ramos, 2015, p.23)

Cuando las investigaciones son de corte cuantitativo, “las variables se desprenden de la hipótesis y su operacionalización permite prueba, para lo cual se apoya en procesos estadísticos” (Tamayo, 2003, p.157).

Por lo tanto, la presente investigación es de tipo cuantitativa, pues es necesario recolectar información estadística para profundizar en el comportamiento que posee el viento en las zonas rurales de difícil acceso del Departamento del Cesar, con el objetivo de analizar los resultados de manera inferencial con base al diseño del prototipo y conocer cuál de estas áreas alcanza un porcentaje de aprovechamiento de este recurso para el correcto uso del aerogenerador de uso doméstico.

3.1.2 Diseño de la Investigación

Teniendo en cuenta, el libro de Tamayo (2003) titulado “El proceso de la investigación científica” se define que el diseño de la investigación es de carácter teórico, debido que para

esbozar el prototipo es necesario analizar las características de las variables eólicas de densidad, dirección y velocidad del viento.

3.1.3 Instrumentos de Recolección de Datos

Para el cumplimiento de los objetivos, es necesario iniciar con la visualización de videos instructivos sobre el uso del software de diseño SolidWorks y ANSYS, con el fin de tener conocimientos en el manejo de estas herramientas.

Luego, de la orientación adquirida se procede a diseñar en SolidWorks las piezas serán ensambladas para dar forma al producto del aerogenerador de uso doméstico, el cual contará con las medidas apropiadas que permitirá alcanzar el funcionamiento eficaz del mismo. De igual manera, en el software de simulación ANSYS se definirán los materiales teniendo en cuenta las bases conceptuales empleadas para el desarrollo del proyecto. Por último, se evaluarán los resultados de la simulación de manera inferencial mediante un análisis estructural y un análisis de flujo del aire.

3.1.4 Técnica de Recolección de Datos

Es necesario considerar las técnicas de recolección de datos al momento de realizar un trabajo de investigación, debido que estas “constituyen el conjunto de instrumentos en el cual se efectúa el método, incorporando el recurso o medio para ayudar a desarrollar la investigación. Además, el uso de técnicas de recolección de la información es una etapa donde se inspecciona y se transforman los datos con el objetivo de resaltar información útil, sugiriendo conclusiones y apoyo a la toma de decisiones”. (Hernandez y Duana, 2020, p.13)

Por lo tanto, en el presente proyecto los resultados se obtendrán mediante el registro de las variables experimentales a partir de la simulación del prototipo en el software ANSYS.

3.1.5 Análisis de Datos

En el presente proyecto se visiona definir un análisis estructural de los materiales del prototipo del aerogenerador de uso doméstico diseñado en SolidWorks y un análisis de flujo del aire para evaluar la interacción de la velocidad del viento. Motivo por el cual, los resultados se desarrollan de manera inferencial, teniendo en cuenta la interpretación de los datos gráficos que maneja el programa de ingeniería avanzada ANSYS, para la simulación del comportamiento del aerogenerador.

En conclusión, el marco metodológico del presente proyecto posee un enfoque cuantitativo de carácter teórico que se cumplirá mediante la utilización de los softwares de diseño SolidWorks y de simulación ANSYS, los cuales permitirán definir un análisis estructural de los materiales pertenecientes al prototipo del aerogenerador doméstico y un análisis de flujo del aire aplicando las condiciones eólicas presentes en el Departamento del Cesar.

4. Resultados

4.1 Análisis de las Características de la Fuente Eólica en el Departamento del Cesar.

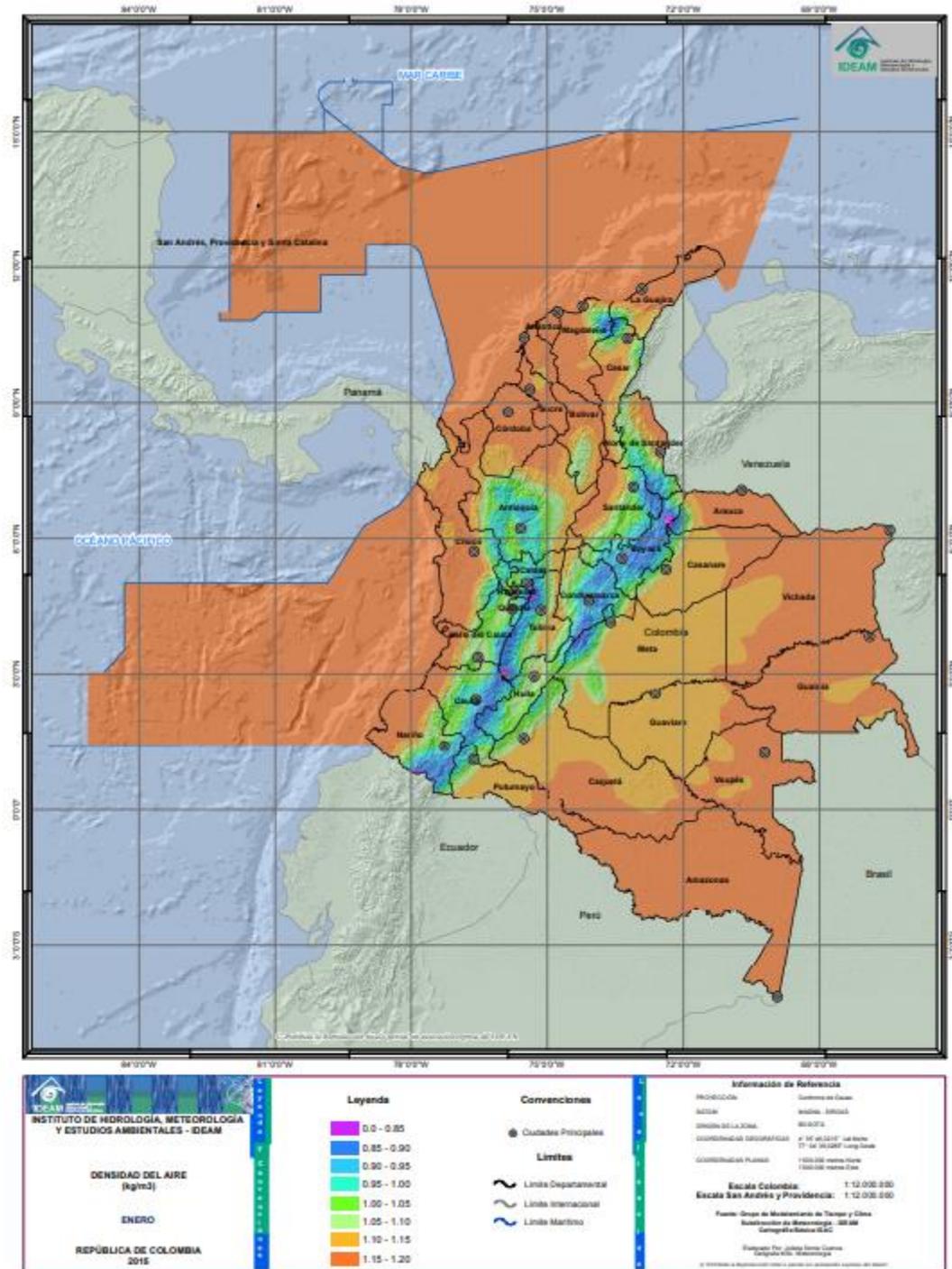
De acuerdo con el IDEAM (2021) se definen las siguientes características del viento que deben ser tenidas en cuenta al momento de implementar un proyecto a base de energía eólica.

- **Densidad del aire:** esta variable se define como la masa por unidad de volumen de gases atmosféricos. Su comportamiento está determinado por la altitud, pues los valores más altos de densidad del aire se presentan en las zonas ubicadas a nivel del mar y van disminuyendo a medida que se avanza en altura.

Otros factores que permiten la variación del parámetro de la densidad del aire son la presión y la temperatura, mediante una respuesta directa e inversamente proporcional, respectivamente.

El valor físico de la densidad del aire es importante si en un volumen dado la densidad del gas es baja, la interacción molecular también lo es; en cambio, si la densidad del gas es mayor, la interacción molecular también lo será. Por lo tanto, este efecto provocaría, en el caso eólico, que un aire más denso golpee mejor las aspas de un molino o haga girar mejor los rotores de una turbina.

A continuación, en la figura 12 se evidencia la densidad del aire representada mediante colores parametrizados en el mapa de Colombia publicado por el IDEAM.

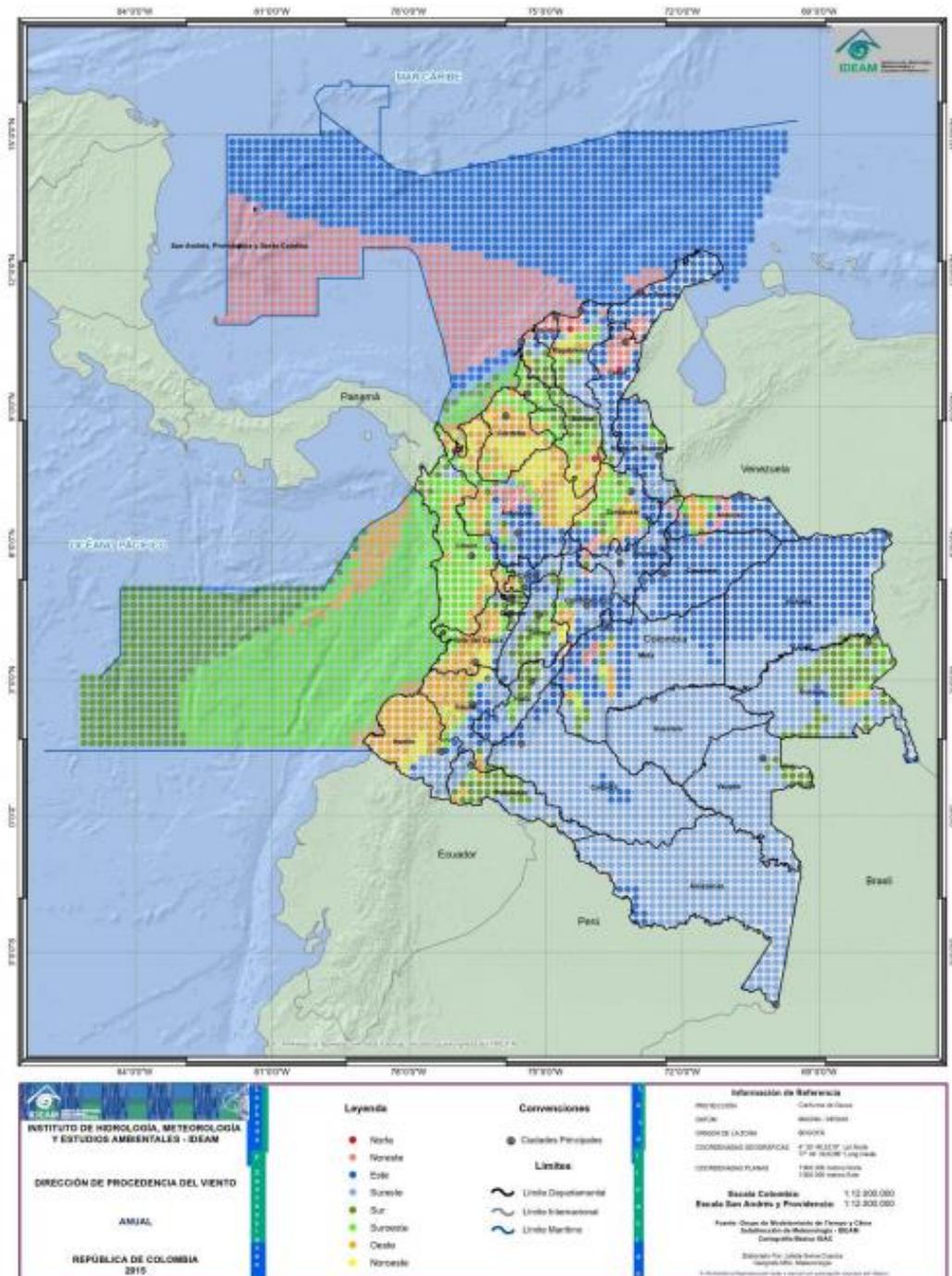
Figura 12.*Densidad del Aire en Colombia*

Nota. Mapa de Colombia representando la densidad del aire. Tomado del IDEAM, 2021.

Según los colores parametrizados del mapa interactivo, es posible inferir que los vientos con intensidades iguales o superiores a 5 m/s proporcionan una alternativa de uso de la energía en el Departamento del Cesar, debido que la densidad del aire se encuentra entre 1 kg/m³ y 1,20 kg/m³. Por lo tanto, esta característica del viento promete viabilidad en los pequeños proyectos eólicos que manejan alturas cerca de la superficie terrestre.

- **Dirección del viento:** se encarga de determinar el punto del horizonte desde el cual sopla el viento. Esta variable se expresa generalmente en grados sexagesimales, contados en el sentido de las manecillas del reloj, a partir del norte geográfico, utilizando los rumbos de la Rosa de Vientos, es decir, se tienen en cuenta las 8 direcciones principales que son: Norte (N), Noreste (NE), Este (E), Sureste (SE), Sur (S), Suroeste (SO), Oeste (O) y Noroeste (NE).

A continuación, se evidencia el mapa interactivo de Colombia publicado por el IDEAM, el cual representa la dirección del recurso eólico mediante la rosa de vientos (Figura 13) y los colores parametrizados (Figura 14).

Figura 14.*Dirección del Viento en Colombia*

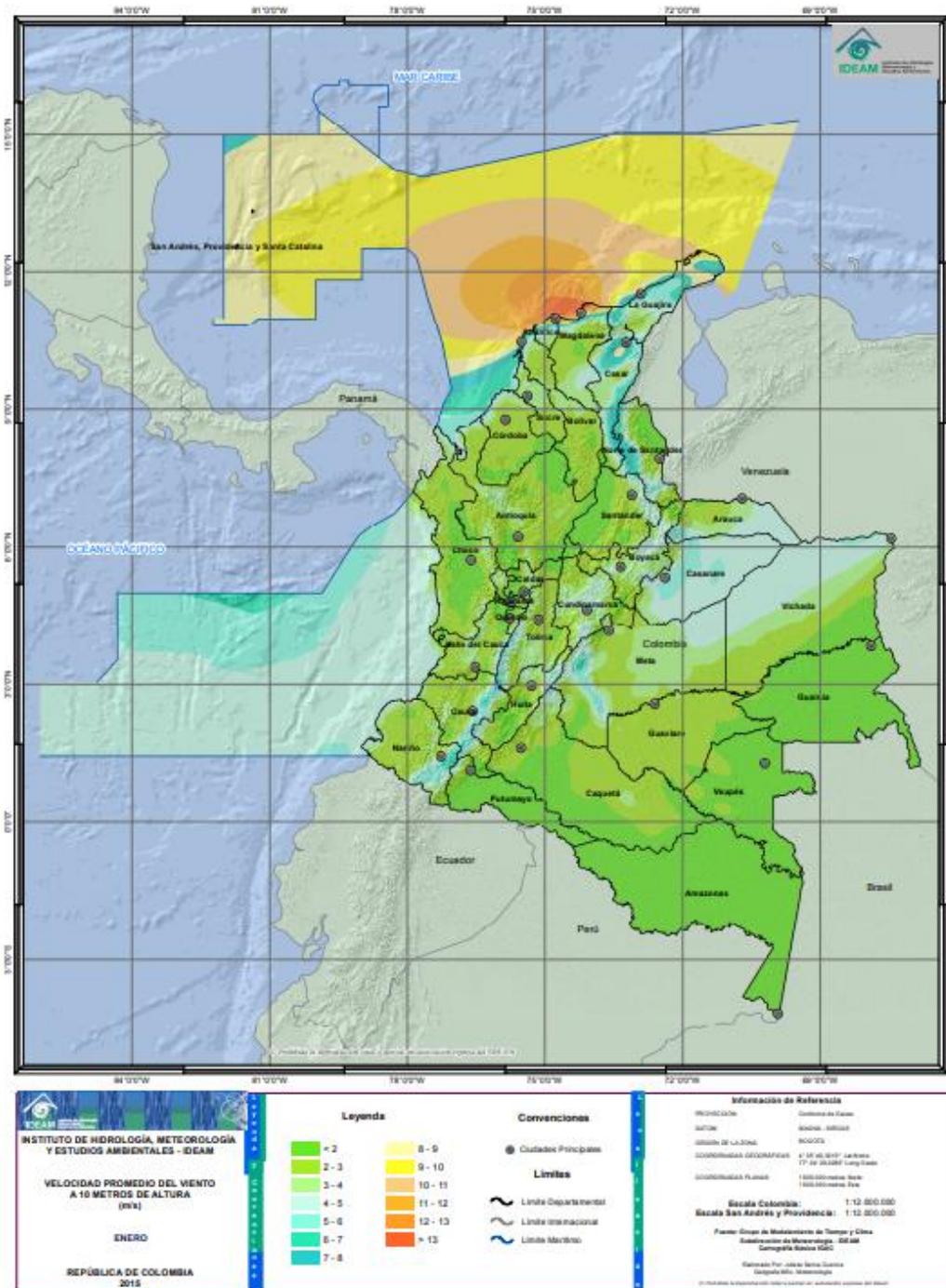
Nota. Mapa de Colombia representando la dirección de procedencia del viento. Tomado del IDEAM. 2021.

Teniendo en cuenta la rosa de los vientos y los colores parametrizados del mapa interactivo de Colombia, es posible inferir que en el Departamento del Cesar la procedencia de la dirección del viento se da desde el Norte, Noreste, Este y Sureste. Por lo tanto, se considera necesario que para los proyectos eólicos se emplee un sistema de orientación, con el fin de captar de manera adecuada las corrientes de viento que permiten generar la energía eléctrica.

- **Velocidad del viento:** es la relación entre la distancia que recorre una partícula de aire en la unidad de tiempo. Habitualmente, se expresa en metros por segundo (m/s), kilómetros por hora (km/h) o en nudos (kt). La “velocidad instantánea” corresponde al caso de un intervalo de tiempo infinitamente pequeño, mientras que la “velocidad media” se relaciona con un intervalo de tiempo finito. Por otro lado, esta variable representa la magnitud que determina la fuerza del vector en el sentido y la dirección del viento, con una longitud proporcional a la velocidad de este. En análisis vectoriales, este parámetro se analiza en los sentidos (este – oeste) y (norte – sur).

A continuación, en la figura 15 se evidencia la velocidad promedio del viento a 10 metros de altura, representada mediante colores parametrizados en el atlas interactivo de Colombia publicado por el IDEAM.

Figura 15.

Velocidad Promedio del Viento en Colombia

Nota. Mapa de Colombia representando la velocidad promedio del viento a 10 metros de altura.

Tomado del IDEAM, 2021.

Teniendo en cuenta los colores parametrizados del mapa interactivo, es posible inferir que en el Departamento del Cesar las condiciones del viento son óptimas para implementar proyectos de energía eólica, debido que la velocidad promedio del viento se encuentra entre 2 a 8 m/s, siendo predominante esta característica en la zona norte del departamento.

4.2 Propuesta del Modelo de Aerogenerador de Uso Doméstico.

4.2.1 Selección de Materiales

Villarubia (2012) menciona en su libro titulado “Ingeniería de la energía eólica” que los factores principales para la selección de materiales son la relación resistencia/peso y el coste económico. Por esta razón, el autor se basa en estos factores y las principales características de cada componente de un aerogenerador para seleccionar y definir los materiales apropiados que permitirán desarrollar las fases de diseño y simulación de la turbina eólica.

Asimismo, en “El libro del Aluminio” publicado por la empresa Alu-Stock S.A (2012); se define al aluminio como un metal plateado muy ligero que se obtiene industrialmente a partir de la bauxita, siendo uno de los productos más grandes en el sector industrial, constructor, de transporte, alimenticio, aeroespacial y en las aplicaciones eléctricas. Este elemento metálico posee un punto de fusión de 660°C, un punto de ebullición de 2.467°C, y una densidad relativa a 2,7 kg/m³.

Al ser considerado un metal muy electropositivo, con gran capacidad de alargamiento, lo cual permite que pueda ser plegado, repujado, prensado, laminado y trefilado sin dificultad. Cabe resaltar, que al momento que el aluminio tiene contacto con el aire se recubre rápidamente con una capa dura y transparente de óxido de aluminio que lo otorga resistencia y lo protege de la corrosión.

4.2.2 Selección del Tipo de Aerogenerador

Villarubia (2012) expone en su libro titulado “Ingeniería de la energía eólica” que los aerogeneradores de eje horizontal más utilizados para la producción eléctrica es el que posee tres aspas, más conocido con el nombre de tripala. Este tipo de aerogeneradores se consideran eólicas “rápidas” pues su velocidad específica de diseño es mayor que la de los multipala, calificados estos últimos como “lentos”.

Asimismo, existen turbinas eólicas para producción eléctrica que cubren una amplia gama de potencias, desde unos pocos cientos de vatios para producción autónoma (micro eólica) hasta algunos miles de kilovatios (mega eólica), para la gran producción eléctrica y su envío a la red.

Además, los aerogeneradores de eje horizontal tripala poseen grandes ventajas que son:

- a) El diseño de eje horizontal tiene unas características que permiten captar de mejor manera el recurso del viento, obteniendo las velocidades más adecuadas para el accionamiento de un generador eléctrico.
- b) Las eólicas de eje horizontal permiten barrer mayores superficies, por lo que desarrollan potencias mucho mayores.
- c) Aprovechan el efecto beneficioso del aumento de la velocidad del viento con la altura respecto al suelo.
- d) El coeficiente de potencia (C_p) en estas turbinas eólicas es mayor para un intervalo de valores de la velocidad específica, obteniendo un mejor rendimiento en un intervalo más amplio de velocidades de viento.

4.2.3 Selección del Sistema de Orientación

Villarubia (2012) menciona en su libro titulado “Ingeniería de la energía eólica”, las principales ventajas de tener un sistema de orientación en los aerogeneradores, definiendo la veleta como un dispositivo que puede girar libremente por acción del viento, con el objetivo de orientar el rotor de forma mecánica, pues al incidir la dirección del viento en la veleta se produce una mejor captación del recurso, provocando mayor eficiencia en la producción de energía eléctrica.

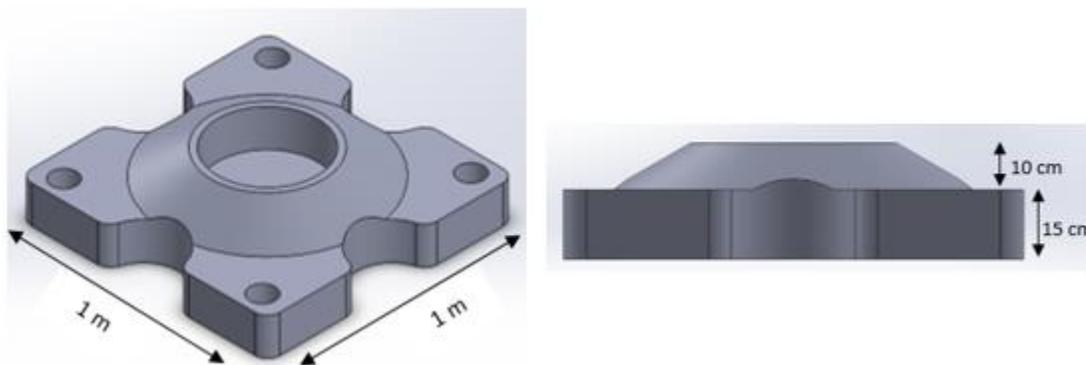
4.3 Diseño de un Prototipo del Aerogenerador en el Software SolidWorks según el Modelo Propuesto.

Teniendo en cuenta el modelo propuesto según los materiales definidos, las ventajas de los aerogeneradores tripala y los beneficios de emplear un sistema de orientación basado en una veleta, se procedió a diseñar el aerogenerador de uso doméstico en el programa de simulación SolidWorks, logrando como resultado el siguiente prototipo: (Ver figuras 16-22)

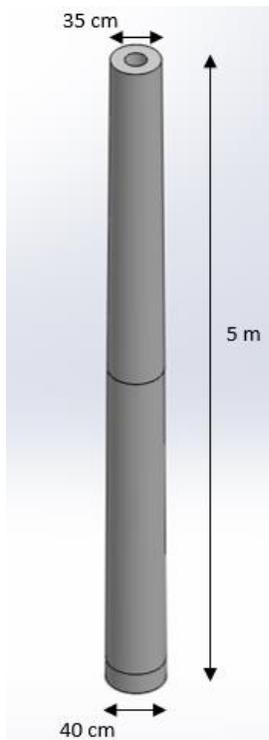
4.3.1 Dimensiones de las Piezas

Figura 16.

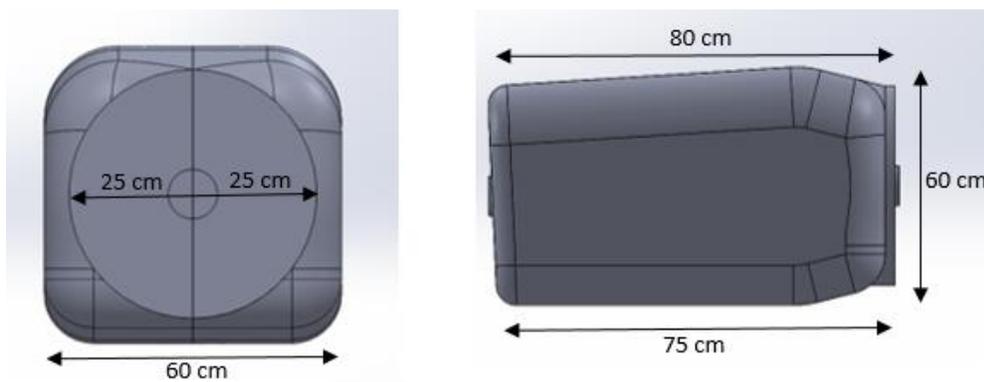
Base del Aerogenerador



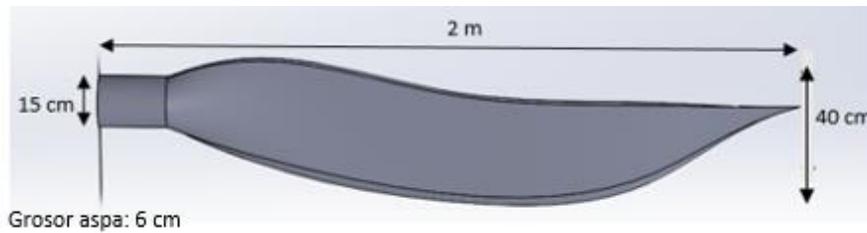
Nota. Dimensiones de la base del aerogenerador. 2021.

Figura 17.*Torre o Mástil*

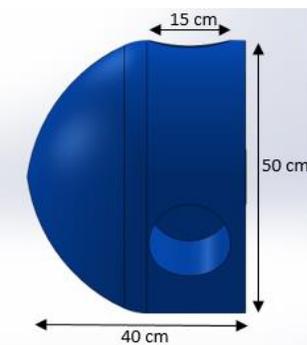
Nota. Dimensiones de la torre del aerogenerador. 2021.

Figura 18.*Góndola*

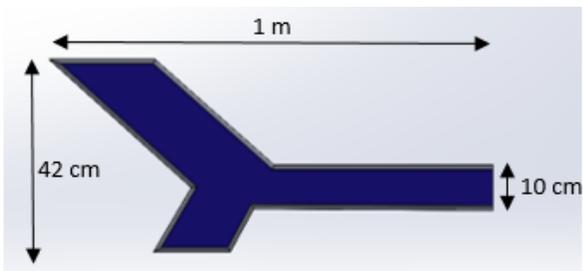
Nota. Dimensiones de la góndola del aerogenerador. 2021.

Figura 19.*Palas o Aspas*

Nota. Dimensiones de las aspas del aerogenerador. 2021.

Figura 20.*Buje*

Nota. Dimensiones del buje del aerogenerador. 2021.

Figura 21.*Veleta*

Nota. Dimensiones de la veleta del aerogenerador. 2021.

Figura 22.*Ensamble Final del Aerogenerador de Uso Doméstico*

Nota. Ensamble final del aerogenerador de uso doméstico. 2021.

4.3.2 Cálculo de la Potencia Eléctrica

De acuerdo a la información anterior, se determinó la potencia eléctrica máxima que producirá el molino, con base al procedimiento establecido por Molina (2016) en el proyecto denominado “Diseño de un aerogenerador que permita generar energía eléctrica en el colegio Ofelia Uribe de acosta comunidad de Yomasa”. (p.23)

A continuación, se evidencian los resultados obtenidos:

4.3.3 Cálculo de la Presión del Viento

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Donde:

d = densidad del viento

v = velocidad del viento

Datos del viento en el Cesar	
Densidad	1,20 kg/m ³
Velocidad	5 m/s

Solución:

$$P_{\text{viento}} = \frac{1}{2} \left(1,20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = 15 \text{ Pa}$$

Conversión P a kN/m² → 1Pa = 0,001 kN/m²

$$P_{\text{viento}} = 15 \text{ Pa} * \frac{0,001 \text{ kN/m}^2}{1 \text{ Pa}} = \underline{0,015 \text{ kN/m}^2} \text{ es la presión del viento en el Cesar.}$$

4.3.4 Cálculo de la Velocidad de Giro del Rotor

$$w = \frac{\lambda * v}{R}$$

Donde:

λ = velocidad específica

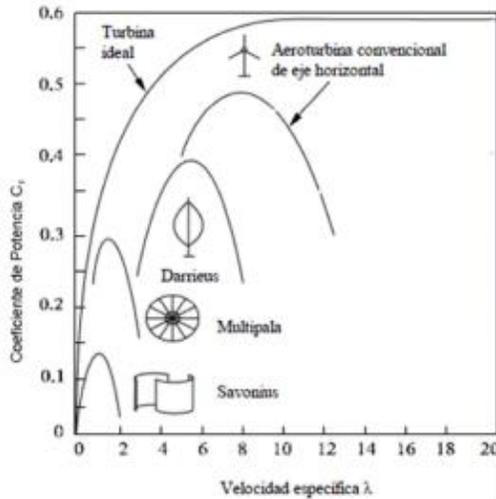
v = velocidad del viento

R = radio del rotor

Rolfot (2014) abarca en su proyecto de investigación denominado “Comparación de Aerogeneradores de Eje Horizontal y Vertical de Pequeña Potencia mediante Estudio Experimental” el gráfico de la figura 23, que representa el coeficiente de potencia en función de la velocidad específica.

Figura 23.

Coefficiente de Potencia en función de la Velocidad Específica



Nota. Coeficiente de potencia en función de la velocidad específica. Tomado de Rolffot. 2014.

Teniendo en cuenta el gráfico anterior, es posible identificar que la velocidad específica (λ) posee un valor de 0,12 para los aerogeneradores tripala de eje horizontal.

Datos	
Velocidad específica	0,12
Radio del rotor	5 cm = 0,05 m
Velocidad del viento	5 m/s

Solución:

$$\omega = \frac{0,12 * 5 \text{ m/s}}{0,05 \text{ m}} = 12 \text{ rad/s}$$

Conversión rad/s a rpm $\rightarrow 1 \text{ rad/s} = 9,54 \text{ rpm}$

$$\omega = 12 \text{ rad/s} * \frac{9,54 \text{ rpm}}{1 \text{ rad/s}} = 114,48 \text{ rpm} \approx \underline{114,5 \text{ rpm}}$$
 es la velocidad de giro del rotor.

4.3.5 Fuerza a la que está Sometida el Rotor

$$F = m * w^2 * R$$

Donde:

m = masa de la pala/aspa

R = radio del rotor

w = velocidad de giro del rotor

Para hallar la masa, se tuvo en cuenta el largo, ancho, grosor de la pala y la densidad del aluminio que fue el material seleccionado para el diseño de las aspas.

Masa de la pala				
Largo (m)	Ancho (m)	Grosor (m)	Densidad del aluminio (kg/m ³)	Masa (kg)
2	0,4	0,06	2,7	0,1296

Solución:

$$F = (0,1296 \text{ kg}) * (114,5 \text{ rpm}) * (0,05 \text{ m})$$

$F = 84,95 \text{ kN}$ es la fuerza a la que está sometida el rotor.

4.3.6 Potencia Eléctrica Máxima

Teniendo en cuenta que el gráfico establece una velocidad específica (λ) para el aerogenerador de 12, el coeficiente de potencia (C_p) respecto a ese valor es de 0,3.

$$P_e = C_p * \frac{1}{2} d v^3 A$$

Donde:

C_p = coeficiente de potencia

d = densidad del aire

v = velocidad del viento

A = Área de las palas

Área de la pala = largo * ancho

$$\text{Área} = 2 \text{ m} * 0,4 \text{ m} = 0,8 \text{ m}^2$$

Solución:

$$Pe = 0,3 * \frac{1}{2} (1,20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) (5 \text{ m/s})^3 (0,8 \text{ m}^2)$$

$$Pe = 18 \text{ kg*m/s}$$

Conversión kg*m/s a vatio → 1 kg*m/s = 9,80 vatios ≈ 10 vatios

$$Pe = 18 \text{ kg*m/s} * \frac{10 \text{ vatios}}{1 \text{ kg*m/s}}$$

$$Pe = 180 \text{ vatios} * \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ Vatios}} = 0,18 \text{ kW}$$

es la potencia eléctrica máxima que producirá

el prototipo del aerogenerador de uso doméstico.

4.4 Evaluación de la Viabilidad del Prototipo mediante Simulación en el Software ANSYS.

Para evaluar la viabilidad del presente proyecto, fue necesario realizar un análisis estructural al conjunto de materiales seleccionados y un análisis de flujo del aire sobre el diseño de las aspas propuestas mediante el software de simulación ANSYS.

A continuación, se evidencian los resultados obtenidos:

4.4.1 Análisis Estructural

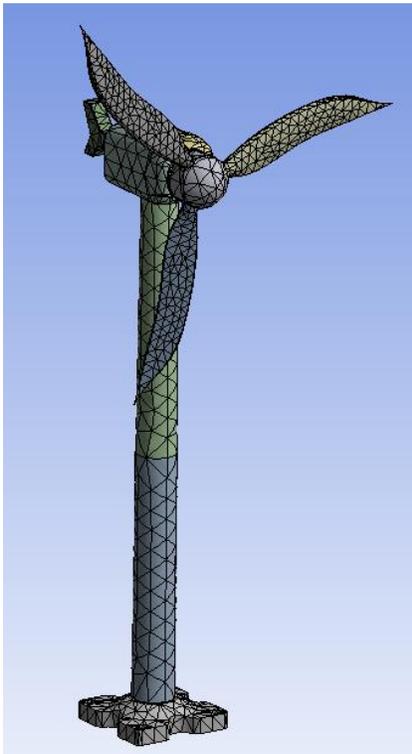
El análisis estructural o simulación estática permite evaluar el desempeño del material teniendo en cuenta los efectos que generan las cargas aplicadas sobre una determinada estructura, en este caso, el aerogenerador de uso doméstico. Del mismo modo, se identificaron los puntos de tensión, la deformación de los componentes y el factor de seguridad que posee la estructura.

Inicialmente, se implementó un mallado a la estructura del aerogenerador (Figura 24), con el objetivo de subdividir el modelo en pequeños elementos para el reconocimiento de este en el software, y así obtener mayor precisión en la evaluación del análisis estructural al momento de

aplicar la presión del viento en el Cesar, la cual fue de 15 Pa, según los cálculos anteriormente realizados.

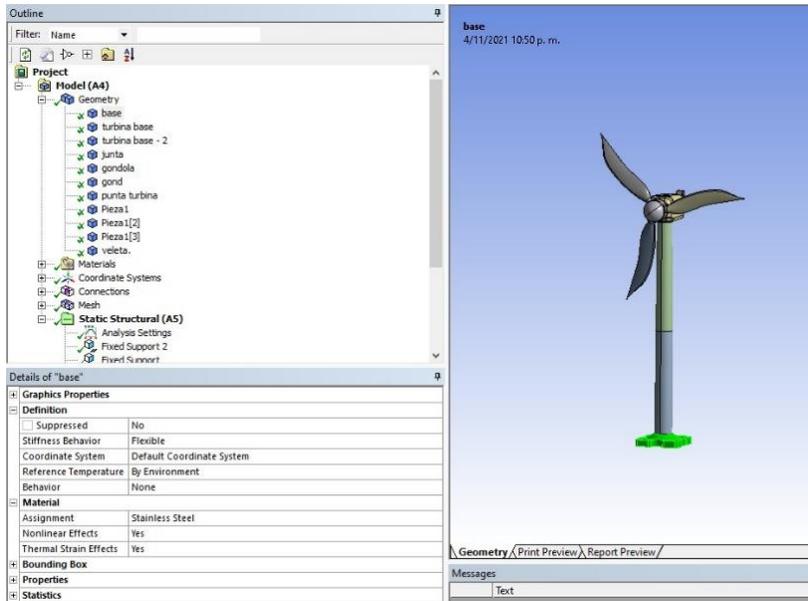
Figura 24.

Mallado del Prototipo

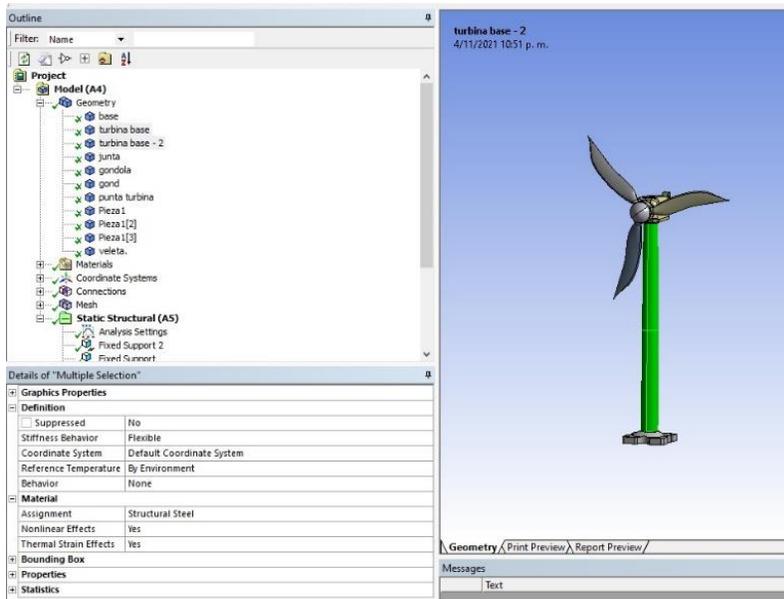


Nota. Mallado en la estructura del aerogenerador. 2021.

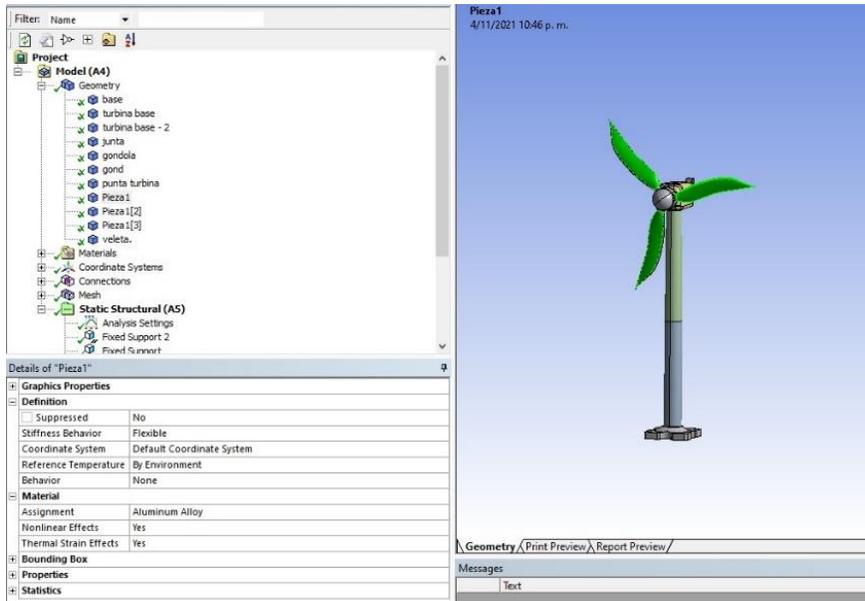
Luego, se inició el proceso de simulación aplicando los materiales seleccionados a la estructura superior e inferior del aerogenerador, los cuales fueron aluminio y acero comercial, respectivamente. Además, por defecto del programa ANSYS se emplearon las propiedades necesarias de cada material permitiendo llevar a cabo el análisis estructural. (Ver figuras 25-28)

Figura 25.*Aplicación de Acero Comercial en la Base*

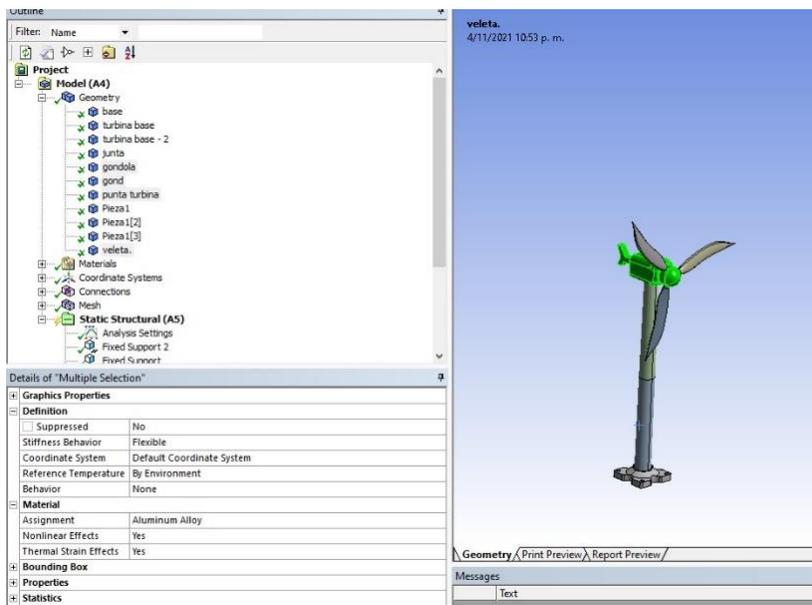
Nota. Aplicación de acero comercial en la base del aerogenerador. 2021.

Figura 26.*Aplicación de Acero Comercial en la Torre*

Nota. Aplicación de acero comercial en la torre del aerogenerador. 2021.

Figura 27.*Aplicación del Aluminio en las Aspas*

Nota. Aplicación del aluminio en las aspas del aerogenerador. 2021.

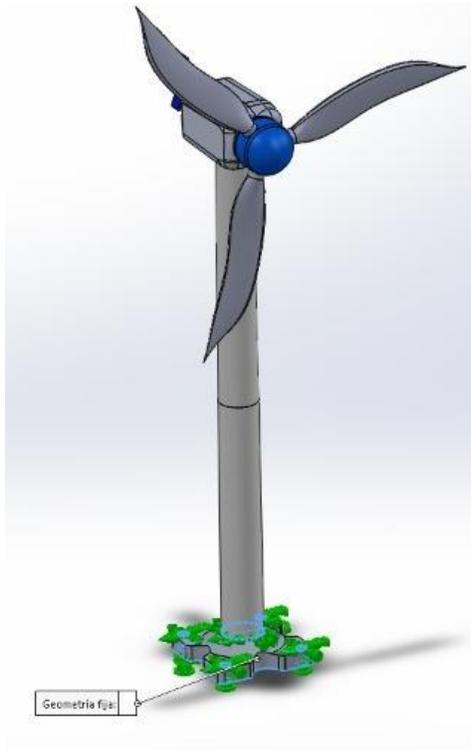
Figura 28.*Aplicación del Aluminio en Góndola, Buje y Veleta*

Nota. Aplicación del aluminio en la góndola, buje y veleta del aerogenerador. 2021.

Para ejecutar la simulación estática, fue necesario establecer unas sujeciones en el modelo del aerogenerador propuesto (Figura 29). En este caso, se aplicaron en la base, pues esta pieza es la unión que sostiene el prototipo con el cimiento.

Figura 29.

Sujeciones del Aerogenerador

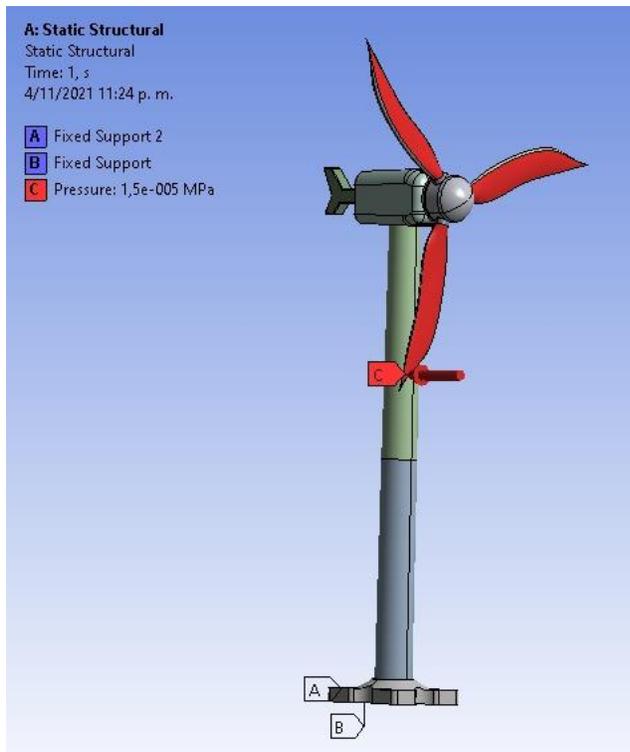


Nota. Sujeciones en la base del aerogenerador. 2021.

El siguiente paso fue la aplicación de la fuerza de la gravedad ($9,81 \frac{m}{s^2}$) en la estructura y la presión del viento en el Departamento del Cesar de 15 Pa sobre las aspas. Esto se puede observar en la figura 30.

Figura 30.

Aplicación de la Presión del Viento en el Cesar



Nota. Aplicación de la gravedad en la estructura y de la presión del viento en el Cesar sobre las aspas del aerogenerador. 2021.

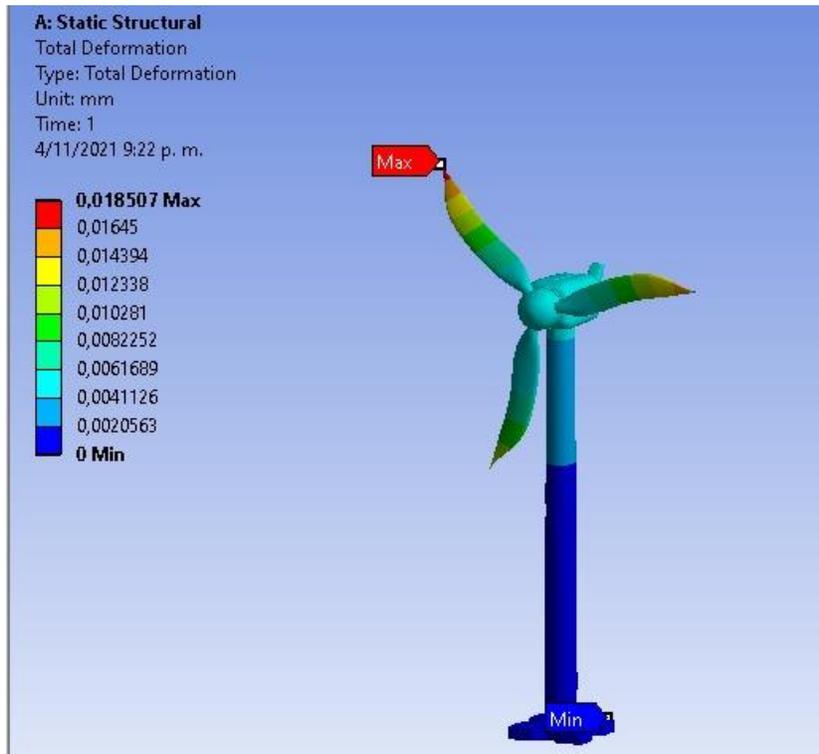
De este modo, se procedió a ejecutar la simulación estática obteniendo los siguientes resultados de deformación, tensión y factor de seguridad para la estructura del aerogenerador de uso doméstico.

La figura 31 muestra la deformación total del aerogenerador, la cual refleja las alteraciones del estado físico de la estructura debido a la fuerza aplicada. Este comportamiento se mide en función de las medidas empleadas para el aerogenerador y la presión del viento en el Cesar, obteniendo como resultado, unos valores de 0 y 0,0185 mm para las deformaciones mínima y máxima, respectivamente. Asimismo, se observó que la mayor deformación la podrían

recibir las puntas de las aspas, sin embargo, los valores de deformación provocada son mínimos sobre la mayor parte del aerogenerador, por lo tanto, no sufrirá ninguna ruptura en sus piezas.

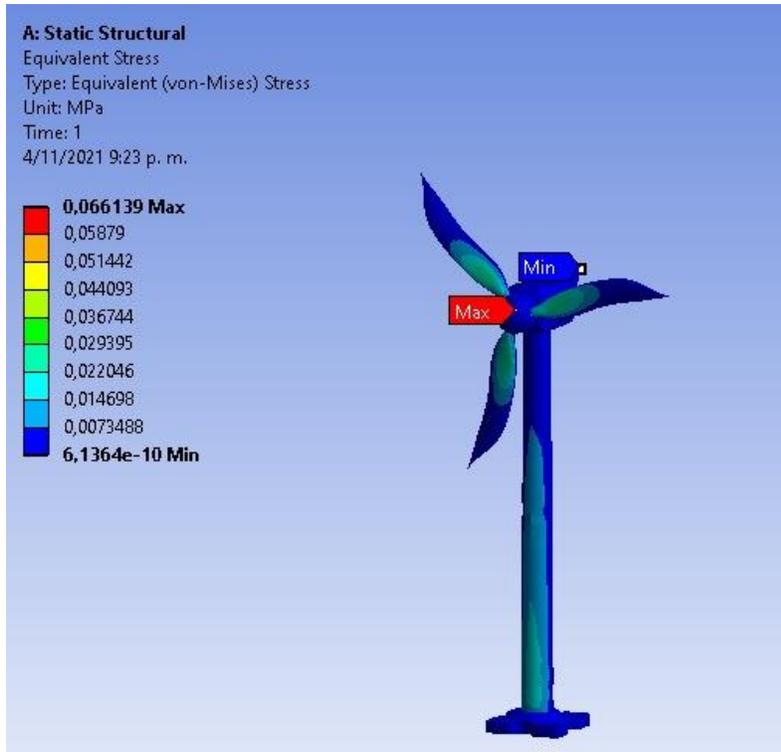
Figura 31.

Deformación Total del Aerogenerador



Nota. Rangos de deformación del aerogenerador. 2021.

La figura 32 muestra la tensión en cada componente del aerogenerador, en la cual se evidencia cuáles son los puntos límites antes de que se produzca la deformación de las piezas. Como resultado, se determinan valores de $6,13e^{-10}$ y 0,066 MPa para las tensiones mínima y máxima, respectivamente. Asimismo, se observó que la mayor tensión se dio en las uniones de las aspas con el buje, pero no supera los 0,036 MPa, por esta razón, al encontrarse dentro de los límites, el prototipo no sufre ningún cambio en su estructura.

Figura 32.*Tensión en la Estructura*

Nota. Rangos de tensión en la estructura del aerogenerador. 2021.

A continuación, se evidencia el factor de seguridad (FDS) obtenido en la estructura, el cual se mide según la presión del viento aplicada. Cabe mencionar que cuando el $FDS > 1$, significa que el diseño es seguro, de lo contrario, si el $FDS < 1$, el diseño es inseguro.

La figura 33, muestra que el FDS obtenido para el aerogenerador posee un valor de 15, es decir, el prototipo puede resistir 15 veces la presión del viento aplicada.

Figura 33.

Factor de Seguridad



Nota. Factor de seguridad del aerogenerador para uso doméstico. 2021.

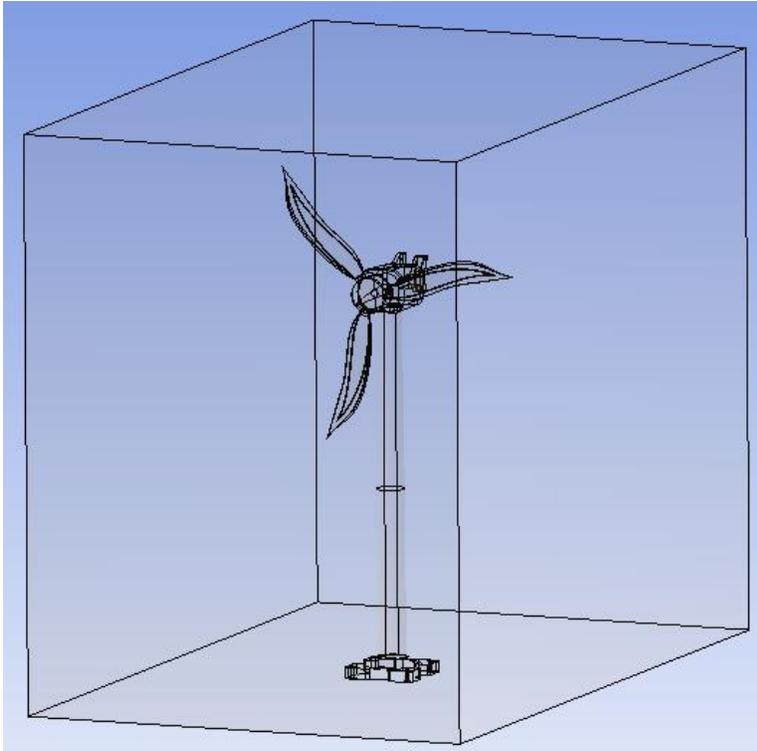
4.4.2 Análisis de Flujo del Aire

El análisis de flujo del aire permite evaluar la interacción del viento con las aspas identificando por medio de colores parametrizados la trayectoria y el comportamiento del flujo del aire.

Inicialmente, se estableció una cabina para la evaluación del flujo (Figura 34) con el fin de simular la entrada y la salida del aire aplicado al aerogenerador.

Figura 34.

Cabina de Evaluación del Fluido

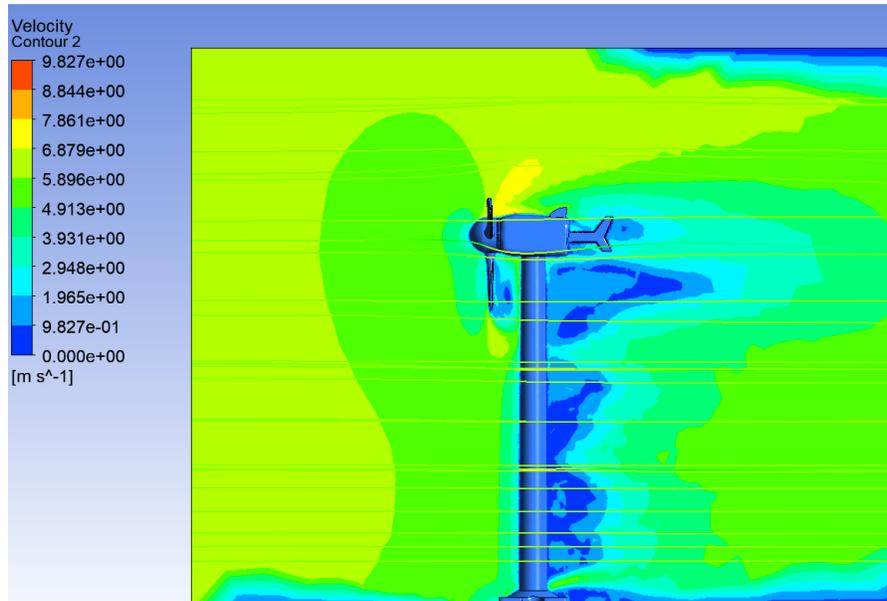


Nota. Cabina de evaluación del fluido eólico. 2021.

Teniendo en cuenta que la velocidad promedio del viento en el Departamento del Cesar se encuentra entre 2 m/s y 8 m/s, se aplicó dentro de la cabina de evaluación para observar la trayectoria del recurso eólico con respecto a la estructura del aerogenerador, como se observa en las figuras 35 y 36.

Figura 35.

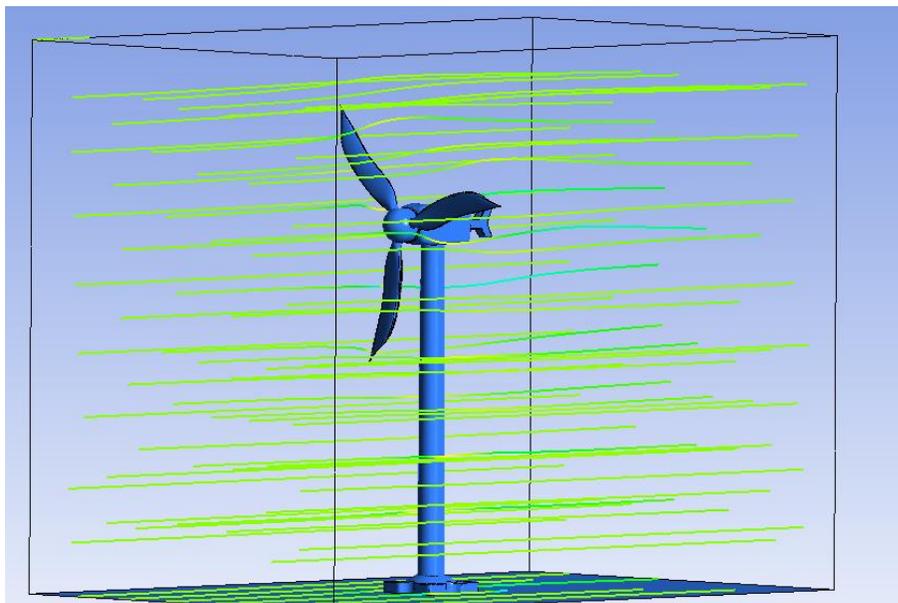
Aplicación de la Velocidad del Viento en el Cesar



Nota. Aplicación de la velocidad del viento presente en el Departamento del Cesar. 2021.

Figura 36.

Trayectoria del Fluido

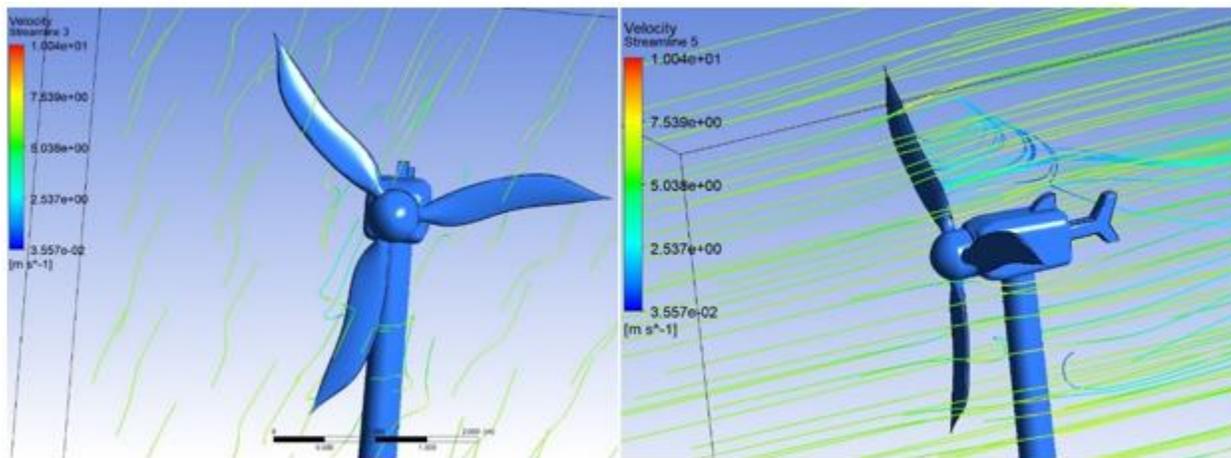


Nota. Trayectoria del fluido eólico con respecto a la estructura del aerogenerador. 2021.

De igual manera, se observó el comportamiento del flujo del aire al tener contacto con las aspas (Figura 37). Gracias a esto, fue posible identificar que el ángulo propuesto al modelo de estas ayuda a la captación del aire de manera eficaz provocando el giro del buje lográndose establecer que el comportamiento es el adecuado para convertir la energía cinética del viento a energía eléctrica, la cual puede ser utilizada para obtener una mejor calidad de vida en las zonas rurales.

Figura 37.

Comportamiento de Flujo del Aire



Nota. Comportamiento de flujo del aire al tener contacto con las aspas del aerogenerador. 2021.

Conclusiones

Mediante el análisis de las características de la fuente eólica en el Departamento del Cesar, se identificó que la densidad, dirección y velocidad del viento son variables deben ser tenidas en cuenta al momento de implementar un proyecto a base de energía eólica.

El Departamento del Cesar cuenta con óptimas condiciones eólicas para el funcionamiento de aerogeneradores de uso doméstico en las zonas rurales, puesto que la velocidad promedio del viento se encuentra entre 2 a 8 m/s, la procedencia de la dirección de la fuente eólica se da desde el Norte, Noreste, Este y Sureste del país y la densidad del aire se encuentra entre 1 kg/m³ y 1,20 kg/m³ proporcionando una alternativa de uso de la energía en el departamento.

Asimismo, al modelo del aerogenerador propuesto se aplicó el aluminio y acero comercial, pues poseen propiedades que prometen resistencia contra la corrosión, durabilidad, y amabilidad con el medio ambiente. Del mismo modo, se decidió emplear el tipo de aerogenerador tripala con un sistema de orientación por veleta, pues el perfil aerodinámico que posee por altura de la torre con respecto al suelo brindó una gran ventaja en el aprovechamiento de la velocidad y captación del viento, provocando mayor eficiencia en la producción de energía eléctrica.

En la etapa de diseño del prototipo, se utilizó el software SolidWorks para el modelado de las piezas al ofrecer una serie de soluciones que cubren los aspectos involucrados en el proceso de desarrollo del molino de viento. Por tal motivo, las medidas del aerogenerador se asignaron con base a la altura promedio de una vivienda rural, la cual se encuentra entre 2,5 a 3 metros.

De igual manera, se consideró que el consumo de las viviendas rurales oscila entre 115 y 140 kw/h, por lo que la potencia energética máxima que producirá el aerogenerador de uso doméstico permite suministrar soluciones oportunas a las comunidades que habitan en estas zonas, brindando un mejor estilo de vida y promoviendo el uso de energías alternativas.

Finalmente, según los análisis realizados en el software ANSYS, se logró inferir que la viabilidad del prototipo tiene como resultado un concepto positivo que ofrece una alternativa de solución a la problemática de la producción de la energía eléctrica que afecta a los habitantes de las zonas rurales de difícil acceso del Departamento del Cesar.

Recomendaciones

- Buscar financiación de tipo pública o privada para la etapa de construcción del proyecto si se desea implementar a gran escala.
- Construir el prototipo para realización de pruebas en condiciones reales, teniendo en cuenta las variables que no se pueden evaluar desde un software de simulación.
- Fomentar la investigación de proyectos de energías alternativas en el Cesar, puesto que las condiciones medio ambientales son óptimas para el funcionamiento de los aerogeneradores además de la alta población que se encontraría beneficiada gracias a esto.
- Ofrecer electivas dentro de la Universidad de Santander que profundicen en el uso de los software de simulación, permaneciendo a la vanguardia de la industria 4.0.

Referencias bibliográficas

- Acciona. (14 de Junio de 2021). *¿Qué es un aerogenerador?* Obtenido de <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-eolica/aerogeneradores/>
- Acciona. (6 de Junio de 2021). *Conversión de la energía eólica a eléctrica.* Obtenido de <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-eolica/aerogeneradores/>
- Alu-Stock S.A. (2012). El Aluminio. En A.-S. S.A, *El libro del Aluminio* (Vol. 5, pág. 412). Alu-Stock.
- Arratia, Chocala, Rodriguez, Rodriguez, Pedro, D. S., & Herrera. (2017). Propuesta de abastecimiento energético en forma independiente para una. *Revista de la Universidad Nacional de la Patagonia Austral*, 21.
- Asociación Empresarial Eólica. (2011). *¿Qué es un aerogenerador? Acércate a la eólica*, 1, 2.
- Asociación Empresarial Eólica. (2021). *Asociación Empresarial Eólica*. Recuperado el 17 de Diciembre de 2021, de <https://aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-y-sus-ventajas/>
- Banco Davivienda S.A. (20 de Febrero de 2020). *El futuro prometedor de la energía eólica en Colombia y el mundo.* Obtenido de <https://www.misfinanzasparainvertir.com/el-futuro-prometedor-de-la-energia-eolica-en-colombia-y-el-mundo/>
- Buelvas, Valencia, & Vanegas. (2017). Estudio estadístico de la velocidad y la dirección del viento en los departamentos de Atlántico y Bolívar en Colombia. *Ingeniare*.
- Consejo Global de Energía Eólica. (2019). *Asociación Empresarial Eólica*. Recuperado el 1 de Julio de 2021, de <https://aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-el-mundo/>
- Contreras, & Rodriguez. (2016). Incentivos a la Inversión de energía eólica en Colombia. *Energía Renovable*, 279-288.

- DANE. (2005). *Dirección de energía eléctrica del departamento del Cesar*. . Obtenido de <http://servicios.minminas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/home/Energia%20Valledupar%20sept.pdf>
- Factorenergía. (23 de Julio de 2018). *¿Qué es la energía eólica?* Obtenido de <https://www.factorenergia.com/es/blog/eficiencia-energetica/energia-eolica/>
- Gobernación del Cesar. (2021). *Gobierno del Cesar*. Obtenido de <https://cesar.gov.co/d/index.php/es/mainmeneldpto/mendeppe>
- Guerrero, Vélez, & Morales. (2018). Energía eólica y territorio: sistemas de información geográfica y métodos de decisión multicriterio en La Guajira (Colombia). *Ambiente y Desarrollo*, 23(44).
- Hernandez, S., & Duana, D. (2020). Técnicas e instrumentos de recolección de datos. *Boletín Científico de las Ciencias Económico Administrativas del ICEA*, 9(17), 3.
- IDEAM. (2017). ATLAS DE VIENTO DE COLOMBIA. En S. J. Ruiz Jose, *ATLAS DE VIENTO DE COLOMBIA* (pág. 158). Bogotá.
- IDEAM. (20 de Junio de 2021). *Atlas interactivo*. Obtenido de <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>
- IRENA. (03 de Marzo de 2021). *International Renewable Energy Agency*. Obtenido de <https://www.irena.org/wind>
- IRENA. (15 de Diciembre de 2021). *International Renewable Energy Agency*. Obtenido de *International Renewable Energy Agency*: <https://www.irena.org/aboutirena>
- Mejía, Chejne, Smith, Rodríguez, Fernandez, & Dyner. (2006). Simulación de producción de energía eólica en Guajira, Colombia. *Energía Renovable*, 383-399.

- Molina, G. M. (2016). *Diseño de un aerogenerador que permita generar energía eléctrica en el colegio Ofelia Uribe de Acosta, comunidad de Yomasa*. Bogotá.
- RAE. (14 de Junio de 2021). *¿Qué es la eólica?* Obtenido de <https://dle.rae.es/e%C3%B3lico>
- Ramos, C. (2015). Los paradigmas de la investigación científica. *Revista psicología*, 9.
- Rolffot, N. (2014). *Comparación de aerogeneradores de eje horizontal y vertical de pequeña potencia mediante estudio experimental*. Cartagena.
- Siemens Gamesa Renewable Energy. (2019). *Los Efectos Socioeconómicos de la Energía Eólica en el Contexto de la Transición Energética*. Recuperado el 16 de Diciembre de 2021, de <https://www.siemensgamesa.com/es-es/-/media/siemensgamesa/downloads/es/explore/informe-del-impacto-socioeconomico-eolico-2019.pdf>
- Tamayo, M. (2003). Investigación cuantitativa. En T. M, *El proceso de la investigación científica* (Vol. 4, pág. 175). México: Limusa.
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. Bogotá: La Imprenta Editores S.A. Recuperado el 18 de Septiembre de 2021, de http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVABLES_WEB.pdf
- Vargas, García, & Krejci. (2019). Prefactibilidad de sistemas eólicos y solares para el autoabastecimiento residencial en 4 localidades urbanas de Colombia: Implicación de nuevos incentivos incluidos en la Ley 1715. *Revista de la Universidad Antonio Nariño*.
- Villarrubia, M. (2012). *Ingeniería de la Energía eólica*. Barcelona: Marcombo.

Anexos

Anexo 1. Video explicativo del Análisis Estructural y de Flujo del Aire

<https://youtu.be/SHKLCPiPKuA>