

Diseño estructural de una turbina eólica de eje vertical tipo Darrieus para las condiciones de viento del cañón del Chicamocha

Carlos Mario Ballesteros Zapata y Cristhian Camilo Calderón Solorzano

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico

Director

Jorge Luis chacón Velasco

Doctor en ingeniería mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

El autor Carlos Mario Ballesteros Zapata dedica este logro a:

Mi familia por el gran esfuerzo que han hecho.

Dedicatoria

El autor Cristhian Camilo Calderón Solorzano dedica este logro a:

A mis padres, pero principalmente a mi madre por su esfuerzo y apoyo incondicional durante todo mi proceso universitario, que, aunque ya no está en este plano, este gran logro fue para ella.

A mi familia por esas voces de aliento que siempre estuvieron presentes durante este largo proceso.

A mi gran amigo Guillermo Velasco que siempre me halo las orejas para que no flojeara tanto y que ha sido un gran apoyo tanto en la universidad como fuera de ella.

Y a todos aquellos que influyeron directa e indirectamente durante el proceso universitario.

Contenido

Introducción	15
1. Planteamiento del problema	16
2. Justificación del problema	20
3. Objetivos.....	21
3.1 Objetivo general.....	21
3.2 Objetivos específicos	21
4. Marco teórico.....	22
4.1 Antecedentes.....	22
4.1.1 Antecedentes internacionales.....	22
4.1.2 Antecedentes nacionales	23
4.1.3 Antecedentes regionales.....	24
4.2 Marco conceptual.....	25
4.2.1 Energía eólica.....	25
4.2.2 Generador eólico	26
4.2.3 Materiales	32
4.2.4 Teoría de aerogeneradores.....	37
4.2.5 Límite de Betz.....	38
4.2.6 Velocidad específica (TSR).....	42
4.2.7 Sistema de transmisión de una turbina eólica	48
4.2.8 Sistema de transformación de energía.....	50
4.2.9 Software de modelado (SolidWorks).....	58
5. Metodología	59

5.1 Velocidad del viento	60
5.2 Potencia nominal.....	61
5.3 Dimensiones del rotor	62
5.3.1 Relación de velocidad de punta (TSR).....	63
5.3.2 Relación de aspecto del álabe (<i>ar</i>)	63
5.3.3 Cálculo del torque.....	65
5.3.4 Perfil aerodinámico	66
6. Cálculo de fuerza de sustentación, arrastre y resultante	72
7. Selección de alternativa	75
7.1 Requerimiento del consumidor	78
7.2 Requerimiento del diseño	79
7.3 Criterio de ponderación y selección.....	79
8. Diseño aerogenerador	81
8.1 Selección de materiales.....	81
8.1.1 Bastidor, brazos y eje.....	81
8.1.2 Rotor Savonius	83
8.1.3 Perfil DU06-W-200.....	84
9. Diseño sistema de conversión de energía	92
9.1 Selección de componentes eléctricos.....	95
10. Prototipo de aerogenerador	103
10.1 Selección del material	105
10.2 Simulación del prototipo de aerogenerador	107
10.3 Proceso de manufactura del prototipo.....	113

11. Pruebas del prototipo	117
11.1 Pruebas del perfil del álabe DU06-W-200.....	121
12. Carga eléctrica en un hogar.....	133
13. Factibilidad económica	134
14. Ficha técnica del aerogenerador.....	137
15. Conclusiones	139
16. Recomendaciones	141
Referencias Bibliográficas	142
Apéndices.....	146

Lista de tablas

Tabla 1. Potencial eólico en diferentes zonas del país	19
Tabla 2. De materiales utilizados en turbinas eólica.....	33
Tabla 3. De los valores de velocidad tangencial periférica y angular para diferentes tipos de aerogeneradores y con una velocidad del viento de 7 m/s.....	46
Tabla 4. Especificaciones del cliente	78
Tabla 5. Matriz QFD	80
Tabla 6. Alternativa ganadora.....	81
Tabla 7. Propiedades mecánicas del acero AISI 1020 laminado en frío.....	82
Tabla 8. Propiedades mecánicas de aleación de aluminio 1060	83
Tabla 9. Propiedades mecánicas del polímero ABS	84
Tabla 10. Características imán NdFeB	92
Tabla 11. Propiedades de masa prototipo aerogenerador.	104
Tabla 12. Propiedades mecánicas del PLA.....	106
Tabla 13. Resultados de la prueba de funcionamiento del prototipo.....	121
Tabla 14. Coeficiente de sustentación y de arrastre para una $V \approx 4,7$ m/s	127
Tabla 15. Coeficiente de sustentación y de arrastre para una $V \approx 5,4$ m/s	128
Tabla 16. Coeficiente de sustentación y de arrastre para una $V \approx 6$ m/s	130
Tabla 17. Presupuesto prototipo.....	135
Tabla 18. Presupuesto aerogenerador	135
Tabla 19. Especificación del aerogenerador	137

Lista de figuras

Figura 1. Indicadores clave de demanda energética estimada, emisiones de CO ₂ e inversión, 2020 en relación con 2019	17
Figura 2. Seguimiento de la demanda de energía del SIN con escenarios UPME octubre 2020	18
Figura 3. Partes de un generador eólico de eje horizontal	27
Figura 4. Clasificación de aerogeneradores horizontales.....	28
Figura 5. Aerogenerador Tipo Savonius	29
Figura 6. Aerogenerador Tipo Darrieus	30
Figura 7. Aerogenerador Tipo Giromill	31
Figura 8. Aerogenerador Tipo Windside.....	32
Figura 9. Preformas de fibra de vidrio	35
Figura 10. Efecto de la velocidad del viento y el diámetro del rotor en la potencia generada en un aerogenerador	37
Figura 11. Representación esquemática de la evolución de la masa de aire que atraviesa un aerogenerador.....	38
Figura 12. Variaciones en la velocidad y presión de la masa de aire que atraviesa el conjunto rotor/palas de un aerogenerador	39
Figura 13. Representación del coeficiente de potencia C_p frente a la inducción axial a	42
Figura 14. Relación λ - C_p ($\beta = 1^\circ$).....	43
Figura 15. Coeficiente de potencia del rotor C_p vs TRS	45
Figura 16. Curvas de potencia producida en función de la velocidad del rotor	47
Figura 17. Potencia vs velocidad del viento	48

Figura 18. Caja de engranajes de turbina eólica híbrida planetaria/helicoidal de tres etapas.....	49
Figura 19. Sistema de transformación de energía	50
Figura 20. Sistemas conectados a la red.....	53
Figura 21. Componentes de un sistema eólico conectado a la red (“On Grind”)	55
Figura 22. Componentes de un sistema eólico conectado a la red (“Off Grind”).....	56
Figura 23. Componentes de un sistema aislado híbrido	57
Figura 24. Metodología desarrollada	60
Figura 25. Vista superior relación aspecto de ala	64
Figura 26. Nomenclatura de perfil aerodinámico	66
Figura 27. Perfil DU06-W-200.....	67
Figura 28. Esquema de un rotor Savonius de un solo paso. (a) Vista frontal; (b) vista superior (rotor Savonius convencional: $e' = 0$).....	68
Figura 29. Rendimiento aerodinámico esperado para un rotor Savonius óptimo.....	70
Figura 30. Esquema del presente prototipo	71
Figura 31. Velocidades actuantes en la hélice.....	72
Figura 32. Fuerzas actuantes	73
Figura 33. Alternativa 1	76
Figura 34. Alternativa 2.....	77
Figura 35. Alternativa 3.....	77
Figura 36. Análisis de esfuerzo del eje	85
Figura 37. Desplazamiento.....	86
Figura 38. Análisis de esfuerzo de los brazos	87
Figura 39. Desplazamiento.....	87

Figura 40. Análisis de esfuerzo del rotor Savonius	88
Figura 41. Desplazamiento.....	89
Figura 42. Análisis de esfuerzo del perfil DU06-W-200.....	90
Figura 43. Desplazamiento	91
Figura 44. Distribución de imanes permanentes del generador de flujo axial.	93
Figura 45. Disposición del generador con el estator.	95
Figura 46. Circuito eléctrico directo.	96
Figura 47. Inverter con controlador MPPT.....	97
Figura 48. Ficha técnica.	98
Figura 49. Circuito eléctrico híbrido.....	99
Figura 50. Controlador MPPT híbrido.	100
Figura 51. Ficha técnica controladora MPPT híbrido	101
Figura 52. Invertidor.	102
Figura 53. Ficha técnica invertidor.....	102
Figura 54. Batería.	103
Figura 55. Vista isométrica estructura	108
Figura 56. Vista lateral derecha	109
Figura 57. Tensiones de Von Mises	110
Figura 58. Vista ampliada de la estructura	111
Figura 59. Desplazamiento del generador	112
Figura 60. Modelo perfil DU06-W-200 para imprimir	114
Figura 61. Proceso de impresión del perfil DU06-W-200	115
Figura 62. Resultado impresión prototipo del aerogenerador y perfil DU06-W-200	116

Figura 63. Prototipo aerogenerador ensamblado	117
Figura 64. Prototipo del aerogenerador funcionando en el túnel de viento	119
Figura 65. Uso de la ley de Betz para hallar la potencia generada por el prototipo.....	120
Figura 66. Partes del túnel de viento	122
Figura 67. Tubo de Pitot	123
Figura 68. Software Edibon SCADA	125
Figura 69. Registro de datos del software	126
Figura 70. C_l y C_d vs ángulo de ataque a $V \approx 4,7$ m/s	128
Figura 71. C_l y C_d vs ángulo de ataque a $V \approx 5,4$ m/s	130
Figura 72. C_l y C_d vs ángulo de ataque a $V \approx 6$ m/s.....	132
Figura 73. Banco de pruebas	133
Figura 74. Consumo promedio de energía en un hogar	134
Figura 75. Generador eólico de eje vertical comercial.	138

Lista de apéndices

Apéndice A. Coordenadas perfil aerodinámico DU06-W-200.	146
Apéndice B. Ecuaciones del EES usados para los cálculos.....	153
Apéndice C. Tabla de valores del software SCADA.....	155
Apéndice D. Dimensiones prototipo.	159
Apéndice E. Planos.	160

Resumen

Título: Diseño estructural de una turbina eólica de eje vertical tipo Darrieus para las condiciones de viento del cañón del Chicamocha. *

Autores: Carlos Mario Ballesteros Zapata; Cristhian Camilo Calderón Solorzano. **

Palabras clave: Generador eólico, perfil tipo Darrieus, cañón del Chicamocha, diseño estructural, generador de eje vertical.

Descripción:

Los procesos de obtención de energía eléctrica de manera convencional están cambiando, permitiendo que entren en escena métodos más amigables con el ambiente, uno de ellos muy conocido es la energía eólica. Haciendo uso de un generador eólico, las corrientes de viento chocan con los álabes de éste transformando la energía del viento en energía mecánica que después será aprovechada como energía eléctrica. Para el desarrollo del proyecto se realizó el diseño de un aerogenerador de eje vertical tipo mixto Darrieus-Savonius ya que por su rendimiento se adapta más fácil a las condiciones de viento del cañón del Chicamocha. Para llevar a cabo las pruebas del aerogenerador se hizo necesaria la utilización de un túnel de viento el cual permite asemejar las velocidades de viento que se encuentran presentes en el cañón del Chicamocha facilitando la obtención y registro de datos, lo que se busca con este proyecto es que la capacidad de generación de la turbina eólica se encuentre en un rango entre 1-2 KWh/día. Para el diseño del prototipo se implementó un mecanismo de 3 hélices rectas tipo DU06-W-200 las cuales fueron construidas en material PLA. La finalidad del proyecto es observar si bajo estas condiciones ambientales (simuladas por medio de un túnel de viento) y el diseño del prototipo del aerogenerador, este podrá satisfacer o apoyar las necesidades eléctricas de un hogar que se encuentre ubicado en este sector.

*Trabajo de grado

** Facultad Fisico-mecánica. Escuela de ingeniería Mecánica. Director: Jorge Luis Chacón Velasco. Doctor en Ingeniería Mecánica

Abstract

Title: Structural design of a Darrieus type vertical axis wind turbine for the wind conditions of the Chicamocha canyon. *

Autors: Carlos Mario Ballesteros Zapata; Cristhian Camilo Calderón Solorzano. **

Keywords: Wind generator, Darrieus type profile, Chicamocha canyon, structural design, vertical axis generator.

Description:

The processes of obtaining electrical energy in a conventional way are changing, allowing more environmentally friendly methods to enter the scene, one of them well known is wind energy. Using a wind generator, the wind currents collide with its blades, transforming the wind energy into mechanical energy that will later be used as electrical energy. For the development of the project, the design of a Darrieus-Savonius mixed type vertical axis wind turbine was carried out, since due to its performance it adapts more easily to the wind conditions of the Chicamocha canyon. To carry out the tests of the wind turbine, it was necessary to use a wind tunnel which allows to simulate the wind speeds that are present in the Chicamocha canyon, facilitating the obtaining and recording of data, which is sought with this project is that the generation capacity of the wind turbine is in a range between 1-2 KWh / day. For the design of the prototype, a mechanism of 3 straight propellers type DU06-W-200 was implemented, which were built in PLA material. The purpose of the project is to observe if under these environmental conditions (simulated by means of a wind tunnel) and the design of the prototype of the wind turbine, it will be able to satisfy or support the electrical needs of a home that is located in this sector.

* Bachelor Thesis

** Physico-mechanical Faculty, School of Mechanical Engineering, Director PhD. Jorge Luis Chacón Velasco, Doctor in Mechanical Engineering

Introducción

Desde que se tiene registro del primer ser humano pensante en la tierra, se ha observado cómo nuestra raza a lo largo del tiempo ha buscado la manera de prosperar en las condiciones más abrasivas que envuelven su entorno y se ha enfocado en encontrar la forma de solucionar la mayoría de los problemas que le acontecen a su alrededor para poder sobrevivir, tenemos en nuestro ADN la necesidad de desarrollar soluciones a los problemas que se nos presentan cotidianamente, gracias a esto hemos presenciado grandes cambios que han ocurrido en el mundo, cambios positivos como los grandes avances en tecnología: internet, vacunas, motores, inteligencia artificial, entre otras cosas. Gracias a estos avances la humanidad ha podido prosperar de una manera exponencial a lo largo del tiempo, pero por su contraparte, este desarrollo también trae consigo una problemática que ha venido creciendo de manera abrupta en los últimos años, y es la contaminación ambiental, estamos viviendo tiempos sin precedentes donde las sequías, incendios forestales, cambios abruptos del clima y el calentamiento global ya se han vuelto algo cotidiano en la vida de las personas y es necesario buscar una solución a estos problemas para poder preservar nuestro planeta. El uso de energías renovables ha venido tomando fuerza en los últimos años ya que es una de las mejores formas que existen para mitigar el impacto ambiental. Las turbinas eólicas son una de las fuentes de energía más renovables porque se aprovecha de la energía del viento para poder transformarla en energía mecánica y al final ser aprovechada como energía eléctrica por los seres humanos. La aplicación de los diferentes diseños de turbinas eólicas que existen depende de las condiciones ambientales en las que se quiere trabajar, en el caso de este proyecto, el lugar al cuál va dirigido el desarrollo de la problemática es en el cañón del Chicamocha, esta zona es bien conocida por su gran recurso eólico y por la cantidad de zonas rurales donde hay poco acceso a la energía eléctrica.

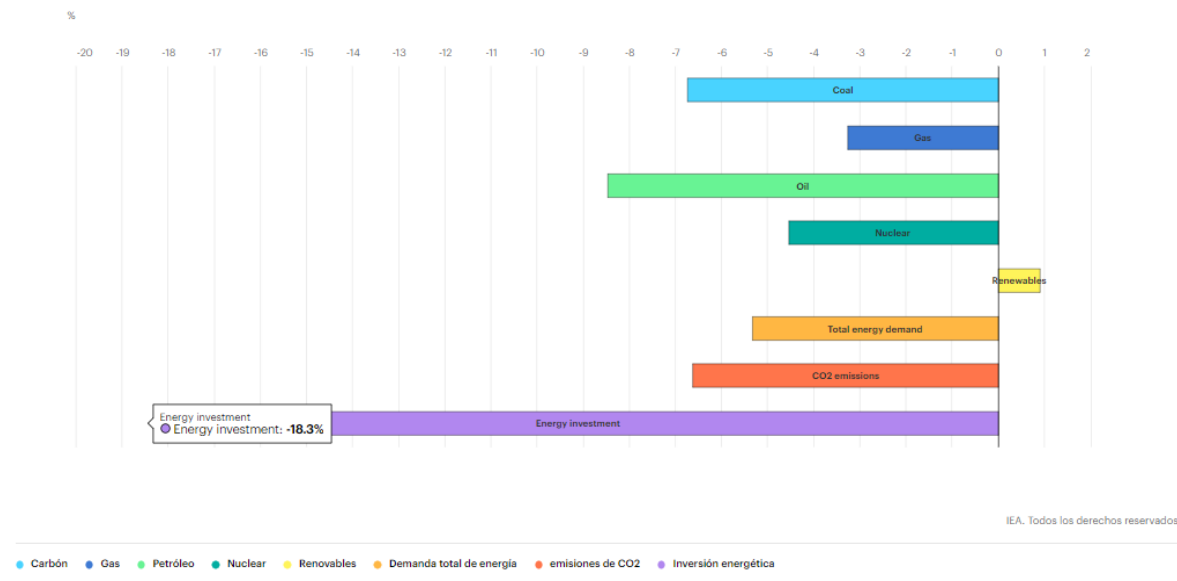
Por lo cual, con el desarrollo de este proyecto, aportaremos a la mitigación del impacto ambiental global y al suministro de electricidad para hogares en el cañón del Chicamocha donde el recurso eléctrico es escaso. Debido a esto plantearemos el diseño estructural de un aerogenerador de 1-2 Kwh/día que permita apoyar el consumo eléctrico de un hogar.

1. Planteamiento del problema

El mundo está viviendo tiempos sin precedentes. La pandemia por coronavirus - COVID-19 ha impactado fuertemente la economía mundial, el uso de energía y las emisiones de CO₂. Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA) habrá una reducción de la demanda mundial de energía, en vista de esta crisis sanitaria las emisiones de CO₂ lograran aplacarse en buena medida, esto es un buen acontecimiento, pero debido a las situaciones por las cuales ocurrirá la reducción de la contaminación el entorno de inversión orientado a la energía sufrirá una disminución. “Nuestra evaluación es que la demanda mundial de energía se reducirá en un 5% en 2020, las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía en un 7% y la inversión en energía en un 18%.” (IEA, 2020).

Figura 1.

Indicadores clave de demanda energética estimada, emisiones de CO2 e inversión, 2020 en relación con 2019

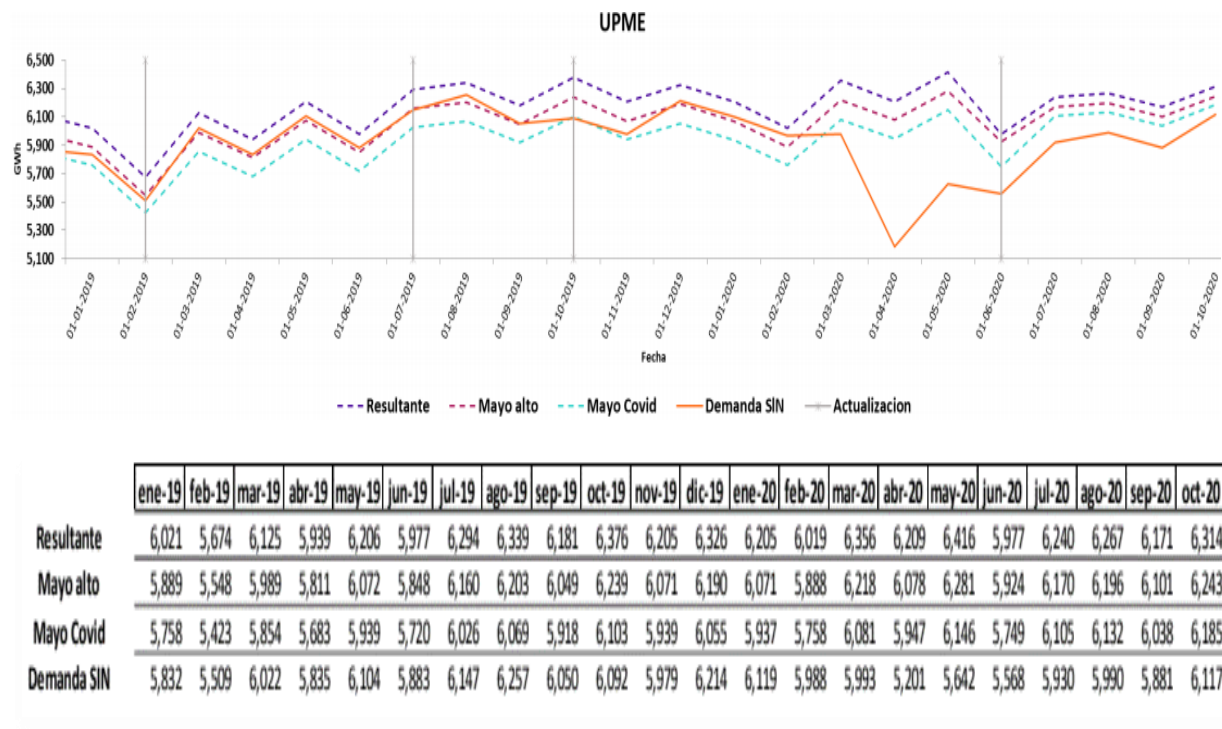


Nota. Adaptado de Agencia Internacional de la Energía (2020).

Colombia, un país el cual posee gran potencial energético se ha visto afectado en gran medida debido a la crisis sanitaria. Hecho que ha ocasionado que la demanda energética de la cual dispone el país se haya disminuido en comparación con los registros como se muestra en la figura 2.

Figura 2.

Seguimiento de la demanda de energía del SIN con escenarios UPME octubre 2020



Nombre anterior	Nombre en la publicación
Escenario Alto	Resultante
Escenario Medio	Mayo alto
Escenario bajo	Mayo Covid

Nota. Adaptado de XM (2020).

En busca de la mejora continua y como señal de alerta ante el déficit energético por el cual se encuentra pasando el país, el gobierno nacional se plantea no descuidar los mecanismos no convencionales de obtención de energía. “el Gobierno ha establecido mecanismos para no descuidar la estrategia de energías renovables, que busca aumentar 50 veces su capacidad instalada, pasando de menos de 50 MW en 2018 a 2.500 MW en 2022.” (ProColombia, 2020).

Para Colombia el recurso eólico todavía no es uno de sus fuertes, pero gracias a su geografía dispone de diversas locaciones en las cuales el recurso natural del viento puede ser aprovechado. El parque eólico Jepirachi ubicado en la guajira el cual consta de 15 aerogeneradores de 1,3 MW dando un total de producción de potencia nominal de 19,5 MW (Empresas Públicas de Medellín, EPM)

Según La Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) el potencial eólico que se encuentra en la región de los Santanderes es bastante aprovechable, en donde las corrientes de aire son de aproximadamente 5.7 m/s, para un caso en concreto el cañón del Chicamocha ya que por su geografía es pertinente la implementación de generadores eólicos de tipo eje vertical (VAWT), ya que por su diseño estructural son de tamaño más reducido en comparación a sus contrapartes los generadores de eje horizontal (HAWT), además de no necesitar un sistema de orientación para poder captar la mayor cantidad de aire.

Tabla 1.

Potencial eólico en diferentes zonas del país

Tabla 2.1. Potenciales para diferentes regiones del país.	
Área	Potencial eólico (MW de capacidad instalable)
Costa Norte	20.000
Santanderes	5.000
Boyacá	1.000
Risaralda - Tolima	1.000
Huila	2.000
Valle del Cauca	500

Nota. Adaptado de (2015) unidad de Planeación Minero-Energética (UPME).

Con todo lo mostrado anteriormente se plantea la siguiente pregunta: ¿Cómo será el comportamiento de la estructura del aerogenerador de eje vertical (VAWT) al estar sometido a las corrientes de viento del cañón del Chicamocha, para la micro generación de energía?

La finalidad del proyecto es mirar hacia el futuro en términos del cambio energético industrial que se aproxima con los años, razón por la cual se desea contribuir y plantear bases para la implementación y estudio de fuentes de energía renovable en el país, con este estudio también se busca mitigar un poco el impacto ambiental que producen las fuentes tradicionales de generación de energía en Colombia.

2. Justificación del problema

En la actualidad existen poblaciones donde el abastecimiento de energía eléctrica (recurso importante para suplir con las necesidades básicas del hogar) se encuentra escaso ya sea por condiciones geográficas de difícil acceso o por falta de recursos en dichas localidades, por lo cual es oportuno incursionar en métodos innovadores de obtención de energía, fiables, económicos y que sean amigables con el ambiente.

Este proyecto se enfoca en el aprovechamiento y transformación de la energía eólica para aportar en la demanda de energía eléctrica que sufren las comunidades del cañón del Chicamocha. Debido a la disponibilidad de corrientes de viento en este sector registradas mediante estudios previos, es pertinente plantear el modelo estructural de un aerogenerador vertical tipo Darrieus ya que su diseño compacto permite la generación de energía a pequeña escala, donde las condiciones de velocidad del viento requeridas para el funcionamiento de dicho aerogenerador son similares a las del cañón del Chicamocha de alrededor de 5,7 m/s.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Diseñar estructuralmente un generador eólico de eje vertical tipo Darrieus haciendo uso de software de modelado para la micro generación de energía bajo condiciones de viento del cañón del Chicamocha.

3.2 Objetivos específicos

1. Calcular las fuerzas a las que estará sometido el aerogenerador con el fin de determinar los esfuerzos mecánicos presentes en la turbina.

2. Analizar tres alternativas para el diseño de la turbina de eje vertical mediante la matriz QFD y seleccionar la mejor opción.

3. Diseñar la estructura del aerogenerador por medio de herramientas CAD, CAE según las especificaciones técnicas, tomando en cuenta: selección de materiales y transmisión de potencia (1-2 KW) para bajas velocidades de viento (4-6 m/s).

4. Realizar una simulación en 3D para determinar el comportamiento del diseño planteado bajo los parámetros establecidos.

5. Elaborar la documentación técnica necesaria para plasmar el diseño: planos de diseño general y de detalle.

6. Construcción de un modelo funcional a escala que compruebe los principios del diseño.

4. Marco teórico

4.1 Antecedentes

En este apartado el lector encontrará los enfoques que se han tomado durante el diseño estructural del generador de eje vertical por parte de otros investigadores.

4.1.1 Antecedentes internacionales

diseño de un generador eólico de eje vertical tipo Darrieus helicoidal de 3 kw (ing. Nuria nelly Mendoza cerón, 2017). De éste trabajo se puede tomar el proceso con el cual se pasó desde la selección del mejor tipo de rotor hasta ya el prototipo final, siendo el de perfil de palas rectas el que funciona con una velocidad más baja además de ello menciona al lector que los materiales seleccionados para el proceso de fabricación están prestos a futuras mejoras para conseguir un mejor desempeño.

Turbinas hidrocinéticas de eje vertical helicoidal (ing. Gabriel pico saltos, ing. Roberto pico saltos, Daniel Mendoza, 2018). De este trabajo permite dar una pauta para el análisis y cálculo de las fuerzas aerodinámicas realizado a los diferentes tipos de aerogeneradores de eje vertical, dando como resultado que las turbinas Darrieus tiene mayor eficiencia por su alto coeficiente de potencia.

An experimental and numerical investigation on darrieus vertical axis wind turbine types at low wind speed, (Nawfal m. Ali, dr. Sattar Aljabair, dr. Abdul Hassan a.k, 2019), De éste proyecto se destaca el proceso de modelado para un perfil de hélice por medio de análisis CFD y las pruebas realizadas por medio de un túnel de vientos de las cuales arroja la cantidad

mínima de palas con las cuales debería ir el aerogenerador para generar electricidad, los cálculos realizados son de gran importancia ya que los valores utilizados se asemejan a las condiciones con las que cuenta el cañón del Chicamocha.

4.1.2 Antecedentes nacionales

Diseño y construcción de un mini aerogenerador de eje vertical, (Carolina Espitia Cita, Lilian Johanna Puerto Molina, 2014). La importancia del proyecto radica en que define el proceso de dimensionamiento del aerogenerador, ya que la turbina entra en funcionamiento a partir de una velocidad mínima del viento de 4 m/s siendo esta inferior a la velocidad que se encuentra la localidad del cañón del Chicamocha, además de dar una sugerencia con respecto a la selección del sistema de transmisión a utilizar, siendo este de tipo polea para que el punto de trabajo fuera a menos revoluciones sin sufrir mayores pérdidas.

Diseño de un sistema de generación de energía eléctrica basado en la utilización de las energías solar y eólica, e integrado en el medio natural, (Diego Martínez Navarro, 2016). De este trabajo se puede tomar como referencia el dimensionamiento utilizado para el aerogenerador de eje vertical con una velocidad media promedio de 4,18 m/s dando como resultado una producción de potencia de 0,6452 W, dando una producción diaria de energía de 15,4848 Wh, dichas velocidades son cercanas a las velocidades con las que cuenta el cañón del Chicamocha.

Diseño de un aerogenerador que permita generar energía eléctrica en el colegio ofelia uribe de acosta comunidad de yomasa, (Milena Molina Galindo, 2016), De este trabajo se denota el proceso de selección de los catálogos para la fabricación del aerogenerador ya que

los materiales deben ser de fácil adquisición permitiendo conseguir un precio razonable a la hora de realizar el proceso de manufactura, además de contar con un diseño el cual minimiza el proceso de mantenimiento.

4.1.3 Antecedentes regionales

Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para la generación a baja potencia (Oscar Iván Orduz Berdugo, Julián Edgardo Suarez Perez, 2011), Se recalca la recomendación acerca del modelo estructural ya que el sistema de sujeción utilizado puede estar presto a balanceos y desalineamiento impidiendo que las cargas a las cuales estarán sometidos los álabes no será de manera equitativa, las condiciones con las cuales se realizaron los ensayos cumplen con los parámetros a implementar por ende es importante tomar de guía varios de los procesos ahí descritos.

Chicamocha canyon wind energy potential and vawt airfoil selection through cfd modeling (I. f. García, j. e Jaramillo and j. I. Chacon, 2020). De éste proyecto se toma el proceso de selección de perfil más óptimo por medio de modelado CFD para las velocidades de las corrientes de viento que pasan por el cañón del Chicamocha, se realiza la comparación del perfil DU06W200 y el NACA0018, siendo el perfil DU06W200 con el que mejor comportamiento aerodinámico trabaja bajo las condiciones descritas, además de ello se realizó el estudio correspondiente de las velocidades de las corrientes de viento que transitan por el sector siendo éstas: mesa de los santos 5.9 m/s; Chicamocha's river 6.9 m/s; panachi 4.3 m/s, las cuales nos darán pauta a la hora de realizar los cálculos correspondientes haciendo uso de estos valores.

4.2 Marco conceptual

4.2.1 Energía eólica

La energía eólica es la energía obtenida del viento. Es uno de los recursos energéticos más antiguos explotados por el ser humano y es a día de hoy la energía más madura y eficiente de todas las energías renovables. El término “eólico” proviene del latín “aeolicus”, perteneciente o relativo a Eolo, Dios de los vientos en la mitología griega.

Generar energía a partir del viento es simple: el viento pasa sobre las aspas del aerogenerador y provoca una fuerza giratoria. Las palas hacen rodar un eje que hay dentro de la góndola, que entra a una caja de cambios. La caja de cambios incrementa la velocidad de rotación del eje proveniente del rotor e impulsa el generador que utiliza campos magnéticos para convertir la energía rotacional en energía eléctrica.

4.2.1.1 Ventajas

- Una de las primeras ventajas de la energía eólica es que es una de las energías renovables porque el viento es un recurso inagotable.
- Se trata de una energía completamente limpia.
- La energía eólica es una de las energías más seguras que existen. Al no producir residuos contaminantes ni suponer un peligro en caso de accidente, se trata de una energía completamente segura.
- Facilidad de montar y desmontar los parques eólicos: la tecnología necesaria a la hora de implementar un parque eólico permite que se lleven a cabo de forma sencilla y bastante efectiva.

4.2.1.2 Desventajas

- Dificultad en la planificación debido a lo imprevisible del viento.
- No se puede almacenar, sino que debe ser consumida de manera inmediata cuando se produce.
- La densidad energética del viento es baja, lo que exige que la cantidad de aerogeneradores sea elevada para que sea útil.
- Requiere una infraestructura de transporte energético, lo que conlleva pérdida de energía y la necesidad de instalar la infraestructura de transporte.

4.2.2 Generador eólico

Son estructuras de gran tamaño que se mueven debido al movimiento del viento (energía cinética) y lo convierten en energía eléctrica.

4.2.2.1 Partes de un generador eólico. En la figura 3 se observan las partes de las cuales se compone un generador eólico de eje horizontal.

Figura 3.

Partes de un generador eólico de eje horizontal

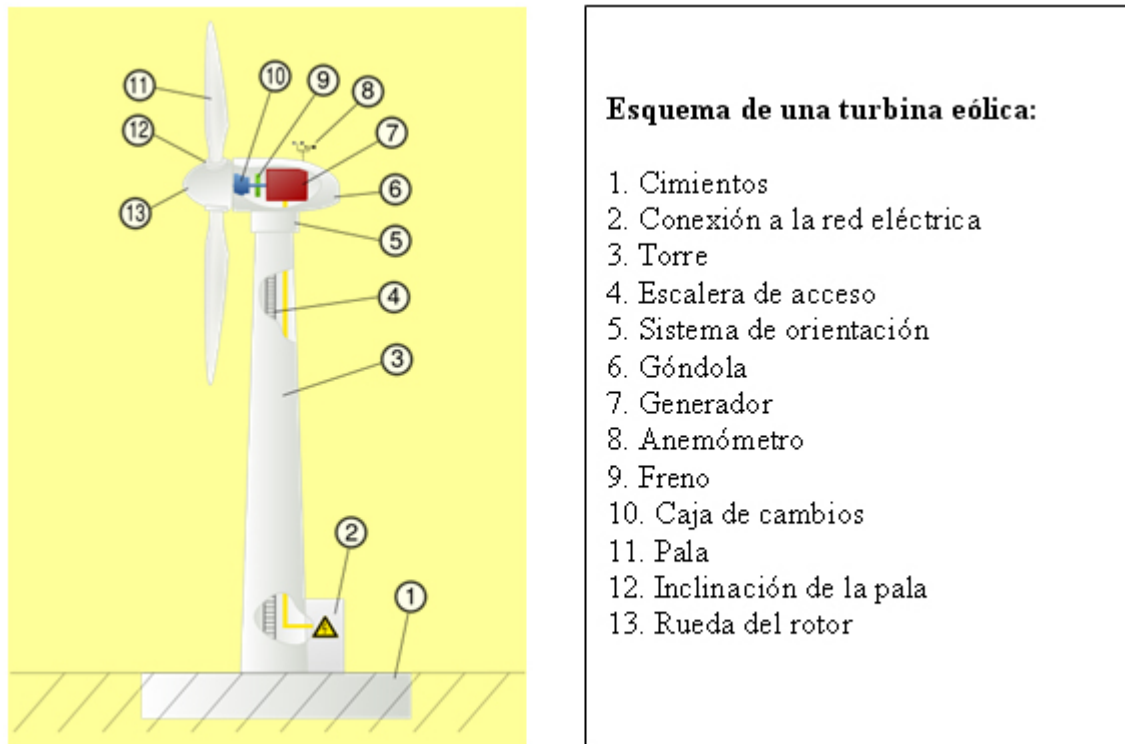


Imagen 16. Componentes de un aerogenerador de eje horizontal

Nota. Adaptado de (e-ducativa).

Las corrientes de aire al chocar con las hélices generan movimiento el cual es transformado en energía eléctrica por medio del generador, a su vez este tipo de generador se orienta por medio de un sistema el cual busca hacia donde está corriendo de mejor manera la corriente de aire para así poderla aprovechar al máximo.

4.2.2.2 Tipos de aerogeneradores

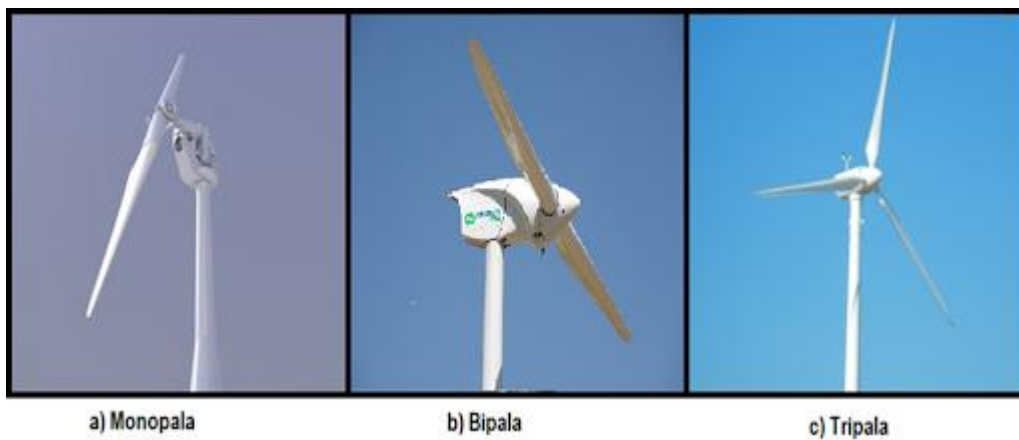
Eje horizontal (HAWT): En la actualidad la gran mayoría de los aerogeneradores que se construyen conectados a red son tripalas de eje horizontal. Los aerogeneradores horizontales tienen una mayor eficiencia energética y alcanzan mayores velocidades de

rotación por lo que necesitan caja de engranajes con menor relación de multiplicación de giro, además debido a la construcción elevada sobre torre aprovechan en mayor medida el aumento de la velocidad del viento con la altura.

En la figura 4 se observan las variantes de palas con las que cuenta un generador eólico de eje horizontal.

Figura 4.

Clasificación de aerogeneradores horizontales



Nota. Adaptado de (Renovatec).

Eje vertical (VAWT): Sus principales ventajas son que no necesita un sistema de orientación al ser omnidireccional y que el generador, multiplicador, etc., son instalados a ras de suelo, lo que facilita su mantenimiento y disminuyen sus costes de montaje. Sus desventajas frente a otro tipo de aerogeneradores son sus menores eficiencias, la necesidad de sistemas exteriores de arranque en algunos modelos, y que el desmontaje del rotor por tareas de mantenimiento hace necesaria que toda la maquinaria del aerogenerador sea desmontada.

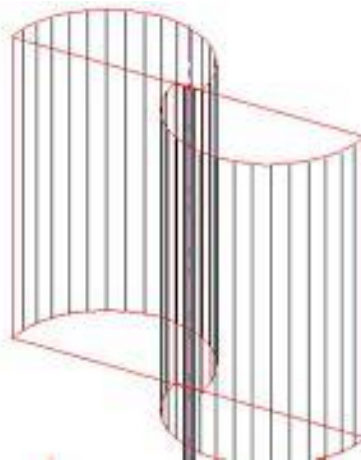
4.2.2.3 Clasificación de aerogeneradores de eje vertical. A continuación, se presentan los diferentes tipos de generadores de eje vertical:

Aerogenerador con rotor Savonius: Es el modelo más simple de rotor, consiste en cilindros huecos desplazados respecto su eje, de forma que ofrecen la parte cóncava al empuje del viento, ofreciendo su parte convexa una menor resistencia al giro. Se suele mejorar su diseño dejando un espacio entre ambas caras para evitar la sobrepresión en el interior de la parte cóncava. Pueden construirse superponiendo varios elementos sobre el eje de giro.

En la figura 5 se observa cómo es la geometría de un aerogenerador tipo savonius.

Figura 5.

Aerogenerador Tipo Savonius



Nota. Adaptado de Opex Energy.

Aerogenerador con rotor Darrieus: Patentado por G.J.M. Darrieus en 1931, es el modelo de los aerogeneradores de eje vertical de más éxito comercial. Consiste en un eje vertical asentado sobre el rotor, con dos o más finas palas en curva unidas al eje por los dos extremos, el diseño de las palas es simétrico y similar a las alas de un avión, el modelo de curva utilizado para la unión de las palas entre los extremos del rotor es el de Troposkien,

aunque puede utilizarse también catenarias. Evita la necesidad de diseños complejos en las palas como los necesarios en los generadores de eje horizontal, permite mayores velocidades que las del rotor Savonius, aunque sin alcanzar las generadas por los modelos de eje horizontal, pero necesita de un sistema externo de arranque.

En la figura 6 se observa cómo es la geometría de un aerogenerador tipo darrieus.

Figura 6.

Aerogenerador Tipo Darrieus



Nota. Adaptado de Opex Energy

Aerogenerador con rotor Giromill: Este tipo de generadores también fueron patentados por G.J.M. Darrieus. Consisten en palas verticales unidas al eje por unos brazos horizontales, que pueden salir por los extremos del aspa e incluso desde su parte central. Las palas verticales cambian su orientación a medida que se produce el giro del rotor para un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento.

En la figura 7 se observa cómo es el diseño característico de un aerogenerador tipo giromill.

Figura 7.

Aerogenerador Tipo Giromill



Nota. Adaptado de Opex Energy.

Aerogenerador con rotor Windside: Es un sistema similar al rotor Savonius, en vez de la estructura cilíndrica para aprovechamiento del viento, consiste en un perfil alabeado con torsión que asciende por el eje vertical. La principal diferencia frente a otros sistemas de eje vertical es el aprovechamiento del concepto aerodinámico, que le acerca a las eficiencias de los aerogeneradores de eje horizontal.

En la figura 8 se observa cómo es el diseño característico de un aerogenerador tipo windside.

Figura 8.

Aerogenerador Tipo Windside



Nota. Adaptado de Opex Energy.

4.2.3 Materiales

Fatiga del material

Es bien sabido que muchos materiales que pueden soportar una carga cuando se aplican una vez, no sobrevivirán si esa carga se aplica, se retira y luego se vuelve a aplicar ("ciclar") varias veces. Esta creciente incapacidad para soportar cargas aplicadas varias veces se denomina daño por fatiga.

Las causas subyacentes del daño por fatiga son complejas, pero pueden concebirse de manera más simple como derivado del crecimiento de pequeñas grietas con cada ciclo, las grietas crecen un poco, hasta que el material falla. Esta simple visión también es consistente

con otra observación sobre la fatiga: cuanto menor sea la magnitud del ciclo de carga, mayor será el número de ciclos que el material podrá resistir.

Tabla 2.

De materiales utilizados en turbinas eólica

Subsystems or components	Material category	Material subcategory
Blades	Composites	Glass fibers, carbon fibers, wood laminates, polyester resins, epoxies
Hub	Steel	
Gearbox	Steel	Various alloys, lubricants
Generator	Steel, copper	Rare earth based permanent magnets
Mechanical equipment	Steel	
Nacelle cover	Composites	Fiberglass
Tower	Steel	
Foundation	Steel, concrete	
Electrical and control system	Copper, silicon	

Nota. Adaptado de (MANWELL, MCGOWAN, & ROGERS, 2009).

4.2.3.1 Materiales de la turbina eólica. En las turbinas eólicas se utilizan muchos tipos de materiales, como se resume en la Tabla 2. Dos de los más importantes son el acero y los compuestos. Los compuestos comprenden típicamente fibra de vidrio, fibras de carbono, o madera junto con una matriz de poliéster o epoxi. Otros materiales comunes incluyen cobre y hormigón. A continuación, se proporciona una descripción general de algunos de los aspectos de los materiales más relevantes para las aplicaciones de turbinas eólicas.

Acero

El acero es uno de los materiales más utilizados en la fabricación de turbinas eólicas. El acero se utiliza para muchos componentes estructurales, incluida la torre, el cubo, el

bastidor principal, los ejes, los engranajes y las cajas de engranajes, los sujetadores y el refuerzo en hormigón.

Compuestos

Son el material principal utilizado en la construcción de palas. Los compuestos son materiales que comprenden al menos dos materiales diferentes, más comúnmente fibras mantenidas en su lugar por una matriz aglutinante. La elección acertada de las fibras y el aglutinante permite adaptar las propiedades del compuesto para adaptarse a la aplicación. Los compuestos utilizados en aplicaciones de turbinas eólicas incluyen los basados en fibra de vidrio, fibra de carbono y madera. Los aglutinantes incluyen poliéster, epoxi y éster vinílico. El compuesto más común es el plástico reforzado con fibra de vidrio, conocido como GRP. En las turbinas eólicas, los compuestos se utilizan sobre todo en la fabricación de palas, pero también se utilizan en otras partes de la máquina, como la cubierta de la góndola. Las principales ventajas de los materiales compuestos son: (1) facilidad de fabricación en la forma aerodinámica deseada, (2) alta resistencia y (3) alta relación rigidez / peso. También son resistentes a la corrosión, son aislantes eléctricos, son resistentes a la degradación ambiental y se prestan a una variedad de métodos de fabricación.

Fibras de vidrio

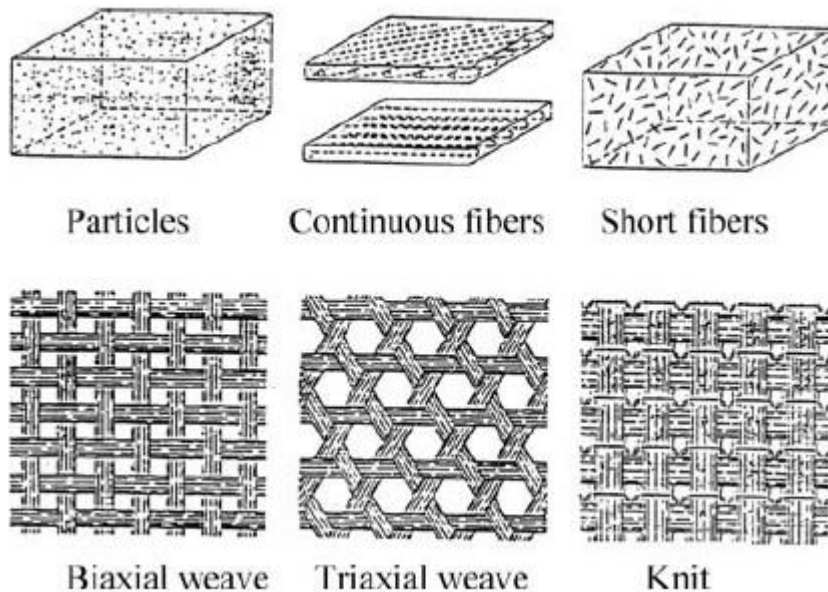
Las fibras de vidrio se forman girando vidrio en hilos largos. La fibra de vidrio más común se conoce como E-glass, un vidrio de aluminosilicato de calcio. Es un material de bajo costo, con una resistencia a la tracción razonablemente buena. Otra fibra común es el vidrio S, un vidrio de aluminosilicato sin calcio. Tiene aproximadamente un 25-30% más de resistencia a la tracción que el vidrio E, pero es significativamente más caro (más del doble).

También hay una fibra de vidrio, HiPER-tex, de Owens-Corning, que reivindica la fuerza del vidrio S con un costo cercano al vidrio E.

Las fibras a veces se usan directamente, pero lo más común es que se combinen primero en otras formas (conocidas como "preformas"). Las fibras pueden tejerse o tricotarse en tela, formarse en hebras continuas o esteras de hebras cortadas, o prepararse como fibras cortadas. Cuando se requiere una alta resistencia, se utilizan haces unidireccionales de fibras conocidos como "estopas".

Figura 9.

Preformas de fibra de vidrio



Nota. Adaptado de (MANWELL, MCGOWAN, & ROGERS, 2009).

Refuerzo de fibra de carbono

Las fibras de carbono son más caras que las fibras de vidrio (aproximadamente en un factor de 8), pero son más fuertes y rígidas. Una forma de aprovechar las ventajas de las fibras de carbono, sin pagar el costo total, es utilizar algunas fibras de carbono junto con vidrio en el compuesto general.

Laminados madera-epoxi

En algunos compuestos se utiliza madera en lugar de fibras sintéticas. En este caso, la madera se preforma en laminados (láminas) en lugar de fibras o telas a base de fibras. La madera más común para laminados de turbinas eólicas es el abeto Douglas. Las propiedades de la madera varían significativamente con respecto a la dirección de la veta de la madera. Sin embargo, en general, la madera tiene una buena relación resistencia / peso y también es buena para la fatiga. Una característica importante de la madera es su fuerte anisotropía en la resistencia a la tracción. Esto significa que los laminados deben construirse con vetas que van en diferentes direcciones para que el compuesto final sea lo suficientemente fuerte en todas las direcciones.

El uso de madera junto con un aglutinante epoxi se desarrolló para aplicaciones de turbinas eólicas en base a la experiencia previa de la industria de construcción de barcos de alto rendimiento. En este proceso se utiliza una técnica conocida como técnica de saturación de madera-epoxi (WEST). Los laminados de madera epoxi tienen buenas características de fatiga: según una fuente (National Research Council, 1991), ninguna hoja de madera-epoxi ha fallado en servicio debido a la fatiga. (MANWELL, MCGOWAN, & ROGERS, 2009).

4.2.4 Teoría de aerogeneradores

La primera relación importante que es necesario conocer es la que indica la potencia del viento transferida a las palas de un aerogenerador:

$$P = \frac{1}{2} \text{masa} \cdot v^2 = \frac{1}{2} (\text{volumen} \cdot \rho) \cdot v^2 = \frac{1}{2} (\pi \cdot R^2 \cdot v \cdot \rho) \cdot v^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 = \frac{\pi}{8} \rho \cdot D^2 \cdot v^3$$

(1)

En la ecuación anterior P es la potencia (W), ρ es la densidad del aire seco, R el radio (D diámetro) del rotor en metros y v la velocidad del viento (m/s), (ABB, 2012).

En la figura 10 se observa como es el efecto de la velocidad del viento en un aerogenerador.

Figura 10.

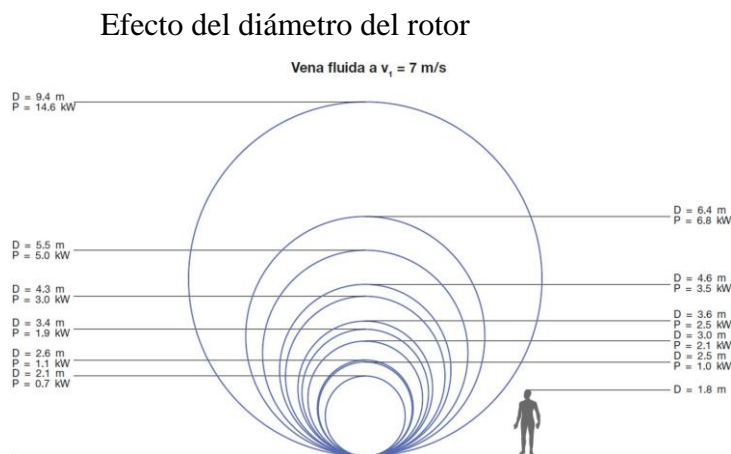
Efecto de la velocidad del viento y el diámetro del rotor en la potencia generada en un aerogenerador

Efecto de la velocidad del viento

$$v_1 = 5 \text{ m/s} \Rightarrow P_{\text{disp}} = 76 \text{ W/m}^2$$

$$v_1 = 6 \text{ m/s} \Rightarrow P_{\text{disp}} = 132 \text{ W/m}^2$$

$$v_1 = 7 \text{ m/s} \Rightarrow P_{\text{disp}} = 210 \text{ W/m}^2$$



Nota. Adaptado de (ABB, 2012).

De esta ecuación se derivan dos conclusiones claras:

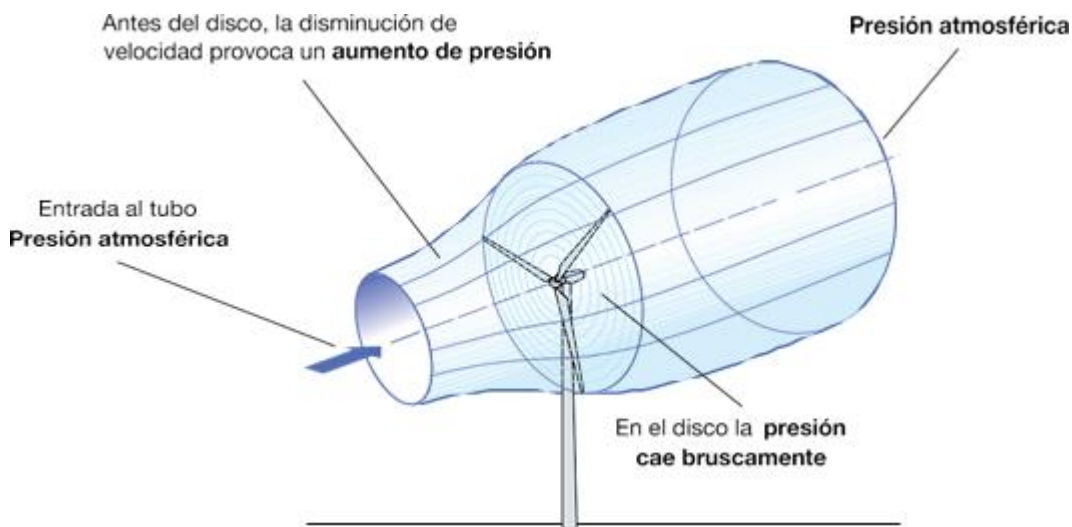
1. Doblando el diámetro del rotor se multiplica por 4 la potencia.
2. Doblando la velocidad del viento se multiplica por 8 la potencia.

4.2.5 Límite de Betz

La máxima eficiencia que puede obtener un aerogenerador puede determinarse mediante la Ley de Betz, la cual se basa en: cuanto mayor sea la energía cinética que la turbina consiga extraer del viento, menor será la velocidad de este a la salida. Como consecuencia el viento se desacelera, de manera que la velocidad aguas abajo del aerogenerador estará comprendida entre cero y el valor que tiene aguas arriba. Para analizarla vamos a fijarnos en la Figura 11, donde se ha representado gráficamente el efecto de expansión de la masa de aire que atraviesa el rotor. (ABB, 2012).

Figura 11.

Representación esquemática de la evolución de la masa de aire que atraviesa un aerogenerador



Nota. Adaptado de (ABB, 2012).

A través de un desarrollo matemático se puede llegar a deducir la siguiente expresión que relaciona la velocidad del viento en el plano del rotor v con v_1 y v_2 :

$$v = \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_2) \quad (2)$$

Llegamos así al denominado factor de inducción axial a , que representa la disminución de velocidad del viento frente al rotor:

$$a = \frac{v_1 - v}{v_1} = 1 - \frac{v}{v_1} \quad (3)$$

La Ecuación 1, que expresaba la potencia transferida por el viento al aerogenerador, también puede expresarse en función de a , de tal manera que:

$$P = 2 \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot a \cdot (1 - a)^2 \quad (4)$$

donde A es el área del rotor.

La eficiencia que puede alcanzar un aerogenerador, entendida como el cociente entre la potencia mecánica en el eje y la disponible en el viento, se suele expresar mediante el coeficiente de potencia C_p :

$$C_p(a) = \frac{P}{P_{disp}} = \frac{2 \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot a \cdot (1 - a)^2}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3} = 4 \cdot a \cdot (1 - a)^2 \quad (5)$$

El valor máximo teórico de C_p se alcanza para $a = \frac{1}{3}$, siendo $C_p = 0.59$.

A este valor se le conoce como límite de Betz y expresa lo siguiente:

“La máxima potencia teórica extraíble de una corriente de aire con un aerogenerador ideal no puede superar el 59 % de la potencia disponible del viento incidente”

Este límite se aprecia perfectamente en la representación de la Figura 13, donde se muestra el valor de C_p frente a a :

La ley de Betz establece por tanto que sólo el 59 % de la energía cinética del viento puede convertirse en energía mecánica para mover el rotor de la turbina. El 59% es por tanto el límite teórico para el rendimiento alcanzable por un aerogenerador. Este valor sería alcanzable sin rozamiento y con una eficiencia de las palas del 100%.

La teoría de Betz es una simplificación ya que no tiene presente algunos aspectos existentes en la práctica como resistencia aerodinámica de las palas, pérdida de energía por turbulencia de la estela, la compresibilidad del aire y la propia interferencia entre las palas.

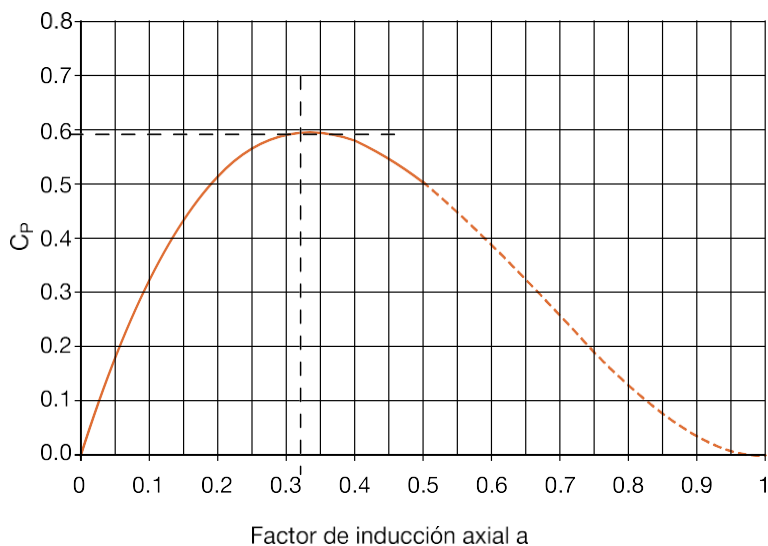
Esta teoría es sólo una aproximación al problema de determinar la potencia que puede obtenerse de una eólica de eje horizontal, pero es útil para establecer un límite superior para el coeficiente de potencia C_p (rendimiento de conversión de potencia eólica-mecánica un aerogenerador). (ABB, 2012)

En la práctica, hay tres efectos que disminuyen el coeficiente máximo de potencia alcanzable:

En la figura 13 se observa la representación gráfica del C_p frente al factor de inducción axial.

Figura 13.

Representación del coeficiente de potencia C_p frente a la inducción axial a



Nota. Adaptado de (ABB, 2012).

- La rotación de la estela detrás del rotor
- El número finito de palas
- La resistencia aerodinámica no nula

En cualquier caso, con los aerogeneradores actuales se consiguen valores de $C_p \approx 0,5$, no lejos del límite teórico de Betz.

4.2.6 Velocidad específica (TSR)

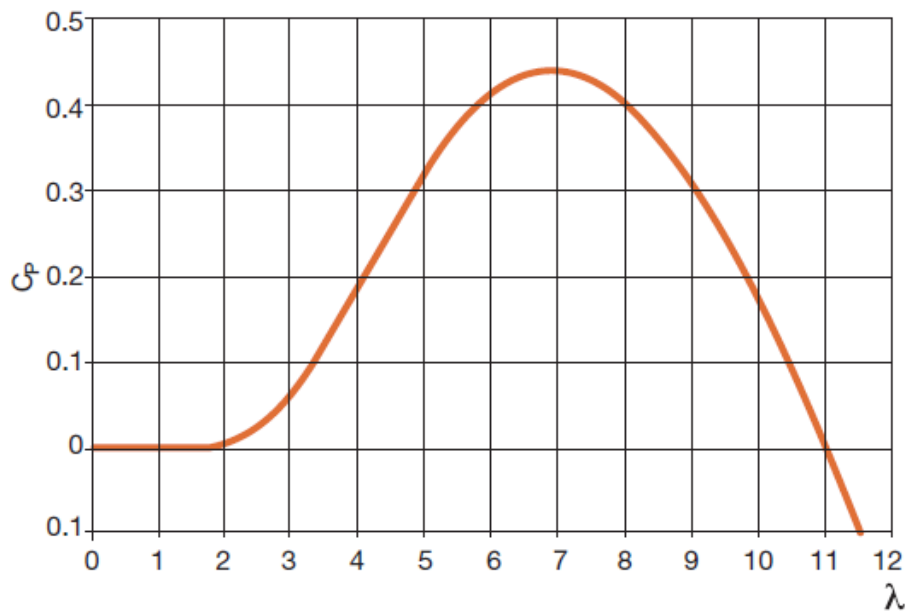
Las características aerodinámicas de una pala generalmente se definen mediante la relación TSR- C_p (figura 14). La *velocidad específica (TSR, Tip Speed Ratio)*, identificada por λ , se define como la relación entre la velocidad tangencial en el extremo de la pala y la velocidad del viento a la entrada del tubo de flujo:

$$\lambda = \frac{v_t}{V_1} = \frac{\Omega \cdot R}{V_1}$$

donde R es el radio del rotor.

Figura 14.

Relación λ - C_p ($\beta = 1^\circ$)



Nota. Adaptado de (ABB, 2012)

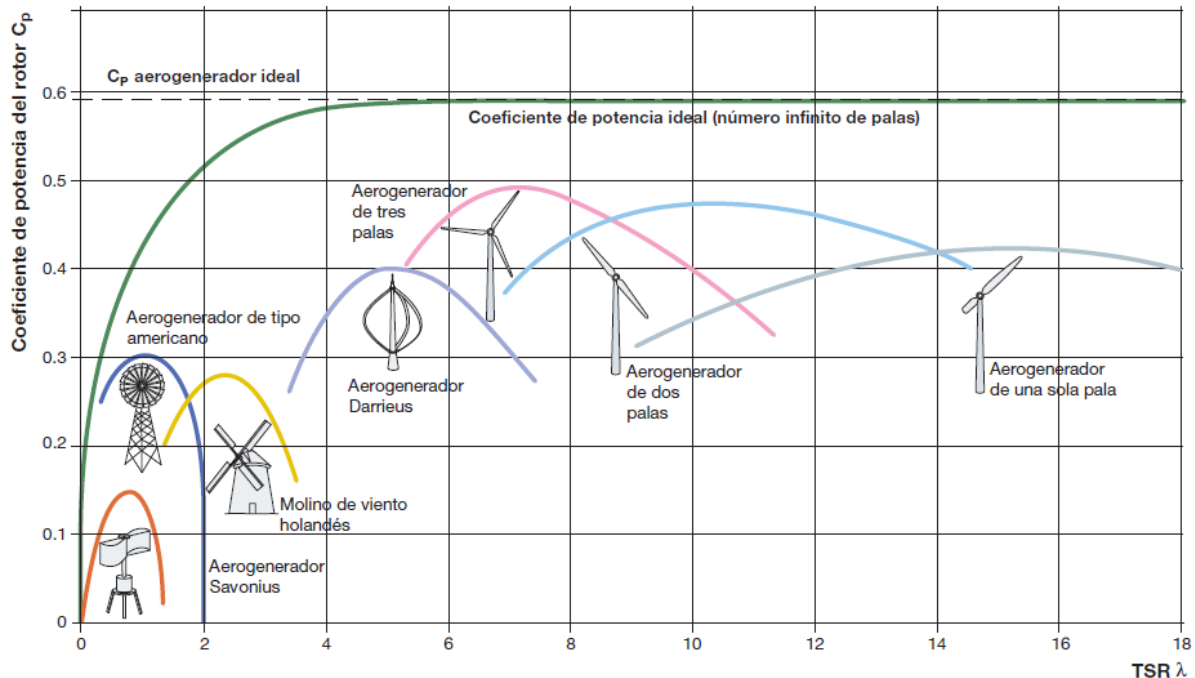
Para una pala dada, la relación λ - C_p depende del ángulo de paso. Manteniendo constante el ángulo de paso se pueden hacer las siguientes consideraciones:

- Hay un único valor de TSR para el cual la eficiencia de conversión es máxima (C_{pmax}) y que depende del tipo de pala;

- Al cambiar la velocidad del viento V_1 , si se quiere mantener la TSR constante e igual al valor para el cual se tiene C_{pmax} , hay que cambiar también la velocidad de rotación de las palas;
- Para valores bajos de TSR se tiene una reducción de la sustentación y un aumento de la resistencia hasta llegar a la condición de pérdida;
- Para valores elevados de TSR se tiene una reducción tanto de la sustentación como de la resistencia, en lo que se conoce como condición "de fuga";
- La TSR óptima depende del número n de palas y cuanto menor es este, más rápidamente deben girar para extraer la máxima potencia del viento (TSR aumenta);
- La forma de la curva de la relación TSR- C_p depende del tipo de aerogenerador (figura 15).

Figura 15.

Coefficiente de potencia del rotor C_p vs TRS



Nota. Adaptado de (ABB, 2012).

Se definen como "*aerogeneradores rápidos*" aquellos que poseen una TSR óptima elevada, mientras que los "*aerogeneradores lentos*" son los de TSR óptima baja. En la tabla 3 se dan los valores de velocidad tangencial periférica y angular para diferentes tipos de aerogeneradores y con una velocidad del viento de 7 m/s, valores calculados mediante sus TSR óptimas obtenidas de la figura 15. Como puede deducirse de los valores de la tabla 3, los aerogeneradores de eje horizontal son rápidos, ya que tienen una elevada velocidad tangencial periférica, incluso teniendo una velocidad angular reducida, dado que el radio del rotor generalmente es mucho mayor que el de las turbinas de eje vertical. (ABB, 2012)

Tabla 3.

De los valores de velocidad tangencial periférica y angular para diferentes tipos de aerogeneradores y con una velocidad del viento de 7 m/s

Tipo de aerogenerador	TSR óptima λ	Velocidad tangencial V_t [m/s]	Radio del rotor R [m]	Velocidad angular Ω [rpm]
VAWT Savonius	1	7	1	67
VAWT Darrieus	5	35	1.5	223
HAWT bipala	10	70	28	24
HAWT tripala	7	49	45	10

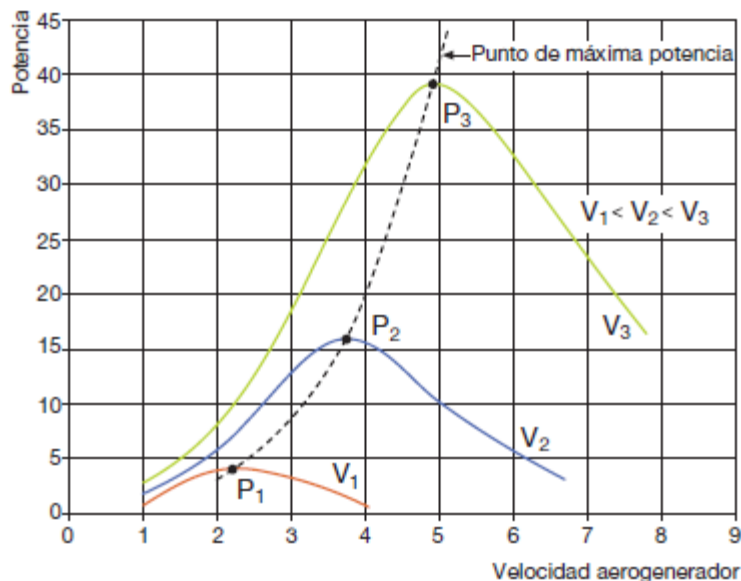
Nota. Adaptado de (ABB, 2012).

Con el fin de maximizar la energía producida anualmente con el funcionamiento del aerogenerador, el coeficiente de potencia C_p debería mantenerse en su valor máximo tanto tiempo como fuera posible, aunque variase la velocidad del viento.

Para ello, la velocidad de rotación del rotor debería variar para mantener la TSR en el valor que maximiza el C_p . En la figura 16 se muestran las curvas de potencia producida en función de la velocidad del rotor, tomando como parámetro la velocidad del viento: para maximizar la producción energética, un aerogenerador debería girar a la velocidad a la cual corresponde al valor máximo de potencia producida para cualquier velocidad del viento en el lugar de instalación. (ABB, 2012)

Figura 16.

Curvas de potencia producida en función de la velocidad del rotor

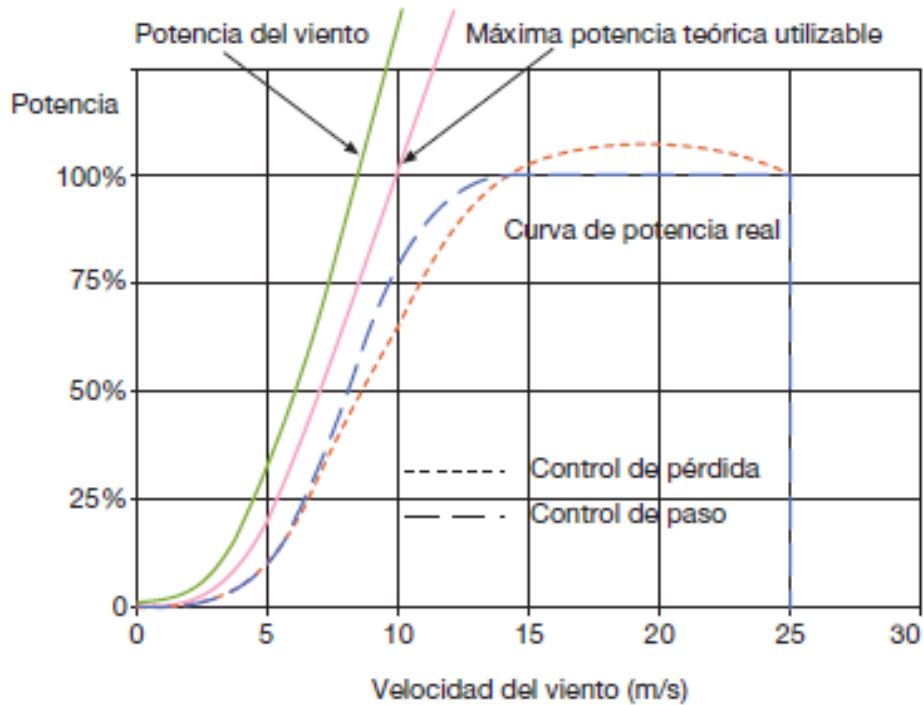


Nota. Adaptado de (ABB, 2012).

En la figura 17 se comparan, en función de la velocidad del viento, la curva de potencia disponible de la vena fluida, la curva ideal del límite teórico de Betz de la potencia máxima extraíble, y las curvas reales de potencia generada en una turbina de control pasivo de pérdida y en una de regulación del ángulo de paso. Como puede observarse, mediante el control de este ángulo, una vez alcanzada la potencia nominal del generador eléctrico es posible mantenerse en valores muy próximos a esta hasta llegar a la velocidad de desconexión. (ABB, 2012)

Figura 17.

Potencia vs velocidad del viento



Nota. Adaptado de (ABB, 2012).

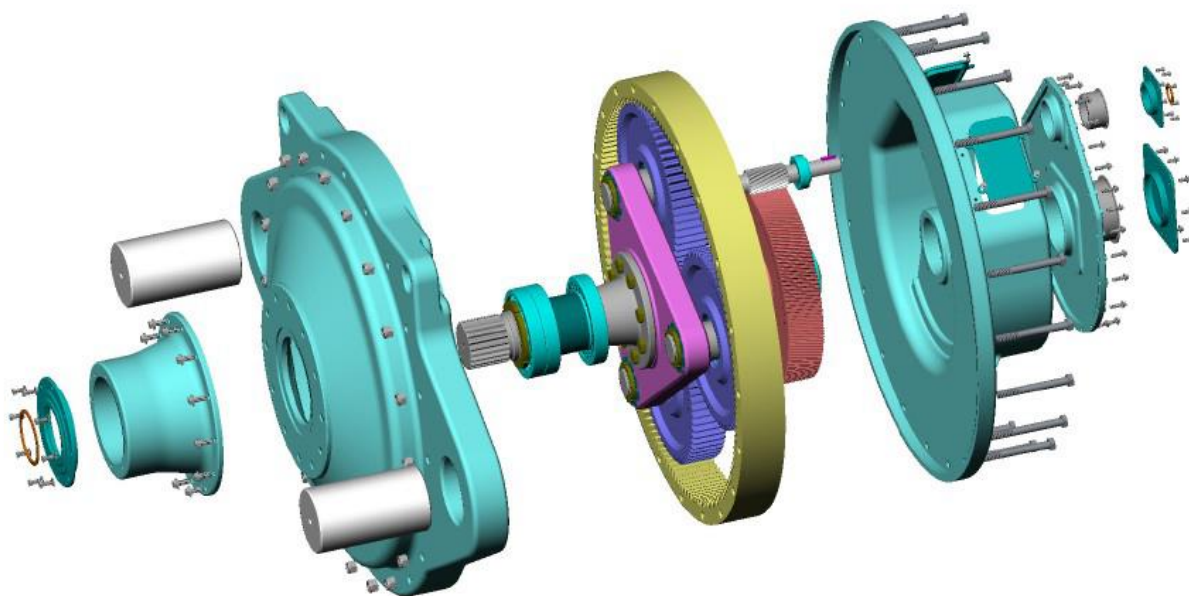
4.2.7 Sistema de transmisión de una turbina eólica

Aunque se han desarrollado y probado varios tipos de trenes de transmisión, la configuración que se muestra en la Figura 18 predomina en la industria de turbinas eólicas. Esto incluye una caja de cambios de relación fija que conecta el eje del rotor con el generador de energía mientras se aumenta la velocidad del eje del rotor en el nivel particular. La mayor fiabilidad, la viabilidad de la construcción y la rentabilidad de este diseño son los principales criterios para la adopción de dicho diseño.

Hay varias configuraciones internas de la caja de cambios, que incluyen ejes paralelos de 3 o 4 etapas, 3 etapas planetarios/híbridos helicoidales, sistemas planetarios compuestos y otras configuraciones. (Serrano, Arroyo, Canteli, Martínez, & Capellán, 2017)

Figura 18.

Caja de engranajes de turbina eólica híbrida planetaria/helicoidal de tres etapas



Nota. Adaptado de (Serrano, Arroyo, Canteli, Martínez, & Capellán, 2017).

4.2.7.1 Cinemática de la caja de cambios. El objetivo básico de la caja de cambios es transferir la energía producida por el rotor a un generador de energía eléctrica generalmente asíncrono. Para lograr este objetivo, la función principal de la caja de cambios es aumentar la velocidad de rotación lenta del rotor eólico hasta el nivel necesario para la conexión con el eje del generador eléctrico. En general, esta demanda se vuelve más intensa al aumentar el tamaño del rotor. En caso de un rotor de gran diámetro, no se permite que la velocidad supere un cierto nivel, de lo contrario la velocidad circunferencial (periférica) de las puntas de las alas obtiene valores extremadamente grandes, generando un elevado ruido

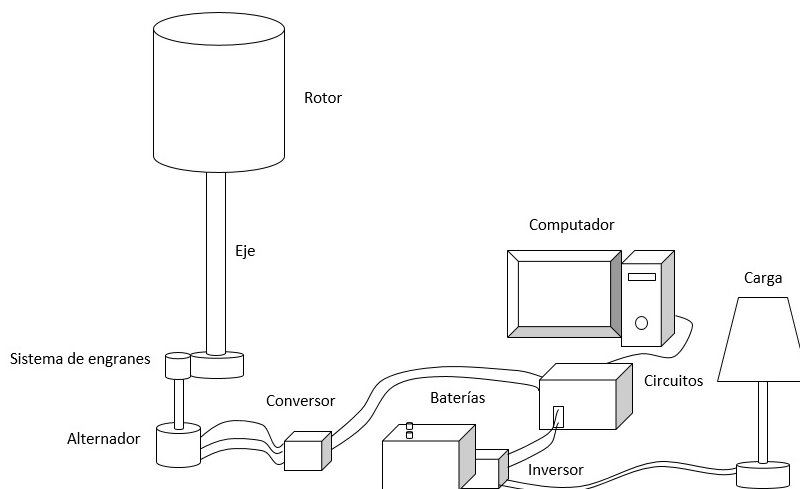
aerodinámico y problemas de vibración de las alas. Otro problema importante causado por la alta velocidad del rotor es el alto nivel de vibraciones estructurales cuando está en funcionamiento y los problemas de inercia de las partes giratorias de toda la construcción. En consecuencia, se recomienda encarecidamente mantener la velocidad del rotor en niveles bajos utilizando un diseño de ala apropiado y luego obtener la velocidad deseada en el eje del generador mediante el uso de la caja de cambios. (Boukios, Costopoulos, Kois, Thanou, & Tsantiotis, 2007)

4.2.8 Sistema de transformación de energía

Los componentes que permiten el proceso de transformación de la energía generada por el viento a una corriente eléctrica son los siguientes, Véase la figura 19:

Figura 19.

Sistema de transformación de energía



Nota. Adaptado de (ARBELÁEZ JARAMILLO & OCHOA PALACIO, 2013).

- **Rotor:** Es la parte de la máquina que transforma la energía del viento en energía mecánica. Aumentando el diámetro de las palas, se puede aumentar la superficie de captación de viento y la potencia proporcionada por la máquina.
- **Alternador o generador:** El objetivo del generador es transformar la energía mecánica procedente del rotor de la maquina en energía eléctrica.
- **Convertidor:** Es un dispositivo electrónico capaz de convertir una señal analógica, ya sea de tensión o corriente, en una señal digital mediante un cuantificador y codificándose en muchos casos en un código binario en particular.
- **Baterías:** Este componente se encarga del almacenamiento de la energía. Tanto en sistemas eólicos como fotovoltaicos, se utilizan baterías de ciclo profundo.
- **Inversor:** Este componente se encarga de transformar la energía eléctrica generada en corriente continua a corriente alterna para alimentar cargas o inyectar a la red.

4.2.8.1 Sistemas eólicos pequeños para generación de electricidad. ¿Se puede conectar una turbina eólica a la red de suministro de la compañía eléctrica?

Estos sistemas pueden conectarse a la red de distribución y se denominan “Sistemas interconectados a la red”, y pueden reducir su facturación de electricidad que utiliza para iluminación, algunos aparatos y calefacción. Si la turbina no puede cubrir la cantidad de energía que usted necesita, la compañía eléctrica cubrirá el faltante. Cuando la turbina eólica produzca más electricidad de la que su hogar requiera, el excedente es vendido a la compañía eléctrica.

Los “Sistemas interconectados a la red” pueden ser prácticos si se cuenta con las siguientes condiciones:

- Usted vive en una zona donde la velocidad promedio del viento es de al menos 10 m.p.h. (4.5 m/s).
- La energía eléctrica que la compañía eléctrica le vende es cara (de 10 a 15 centavos de dólar por kilowatt).
- Los requerimientos para conectar su sistema a la red no son prohibitivamente caros.
- Existen incentivos atractivos para la venta de excedentes eléctricos o para la compra de turbinas eólicas.

Algunos reglamentos exigen a las empresas interconectar y comprar la energía generada por pequeñas turbinas eólicas. Sin embargo, es recomendable ponerse en contacto con la compañía eléctrica, antes de conectarse para conocer y cumplir los requerimientos de calidad y seguridad exigidos. (Cifuentes, 2013).

En la figura 20 se observa cómo es la conexión a la red por medio de un aerogenerador.

Figura 20.

Sistemas conectados a la red



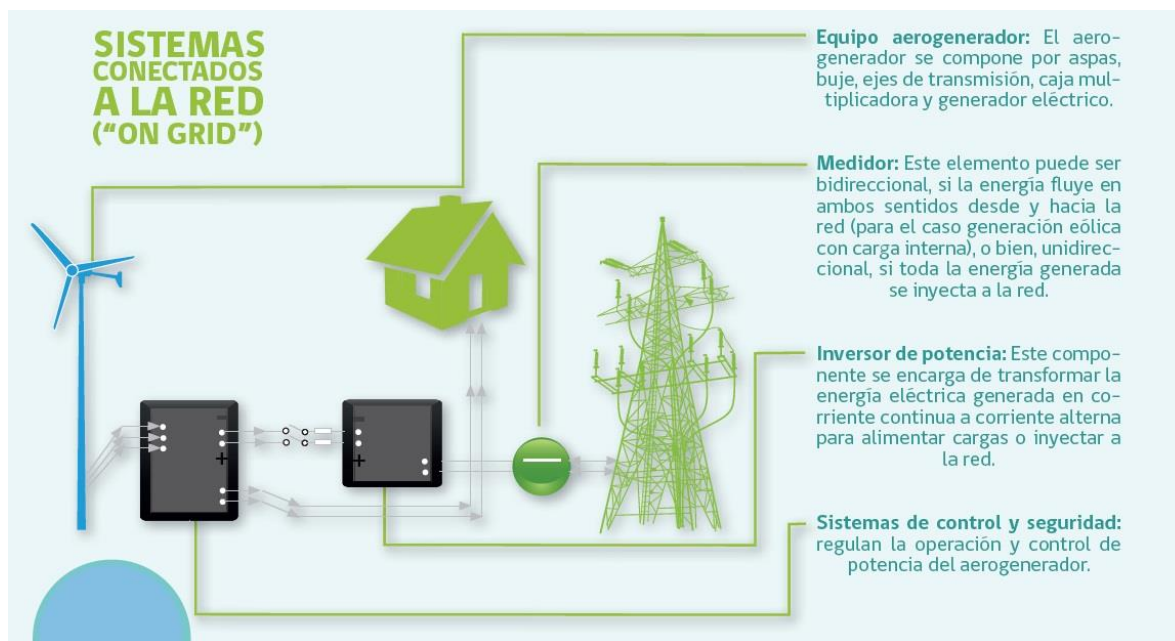
Nota. Adaptado de (Cifuentes, 2013).

4.2.8.2 Sistemas conectados a la red (“On Grid”). Un sistema aerogenerador con conexión a la red (On Grid) es aquel que funciona sincronizado con un sistema eléctrico mayor. En un sistema conectado a la red, el aerogenerador puede destinarse en forma exclusiva a entregar energía al sistema (red central) o bien alimentar una carga interna (por ejemplo, los consumos de un hogar) y entregar los excedentes a la red. En el segundo caso, el sistema aerogenerador alimenta la carga cuando hay suficiente energía contenida en el viento. Si la generación de energía eléctrica del aerogenerador supera la energía consumida desde la carga, entonces los excedentes pueden ser inyectados a la red. En contraparte, si la generación de energía eléctrica generada a partir del aerogenerador no alcanza a suplir la demanda de la carga, este déficit se suple consumiendo energía desde la red eléctrica. En este tipo de sistemas, por tanto, no se utilizan baterías para el almacenamiento de energía ya que el déficit de energía se suple desde la red.

En la figura 21 se observan las partes que conformarían el sistema de conexión a la red eléctrica haciendo uso de un aerogenerador de manera “On Grind”.

Figura 21.

Componentes de un sistema eólico conectado a la red (“On Grid”)



Nota. Adaptado de (Departamento de Energía, 2007).

Dado que este tipo de sistemas inyecta energía a la red, existe una normativa y procedimientos para la conexión, operación y calidad del suministro eléctrico.

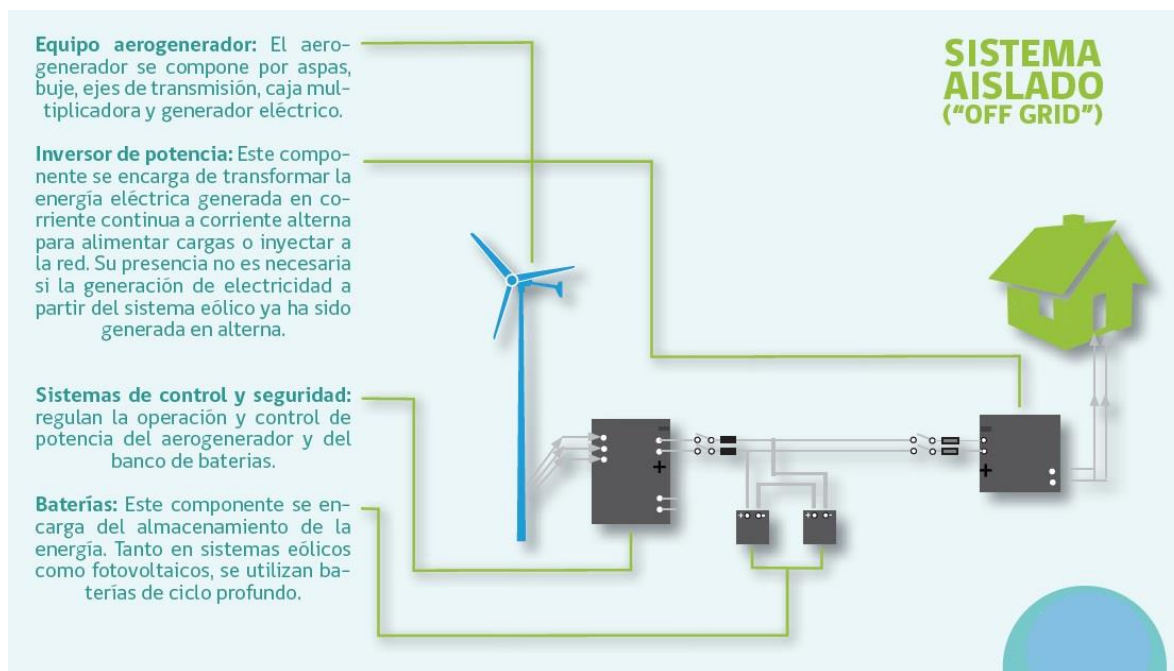
(Departamento de Energía, 2007).

4.2.8.3 Sistema aislado (“Off Grid”). Un sistema aerogenerador sin conexión a la red (Off Grid) que alimenta cargas que funcionan aisladas. El factor clave en el diseño de este tipo de sistemas es contar con sistemas de respaldo, tales como bancos de baterías que permitan mantener un suministro continuo de energía. Dado que este tipo de sistemas no inyecta energía a la red, la normativa asociada no es tan extensa como para los sistemas conectados a la red. (Departamento de Energía, 2007).

En la figura 22 se observan las partes que conformarían el sistema de conexión a la red eléctrica haciendo uso de un aerogenerador de manera “Off Grid”.

Figura 22.

Componentes de un sistema eólico conectado a la red (“Off Grid”)



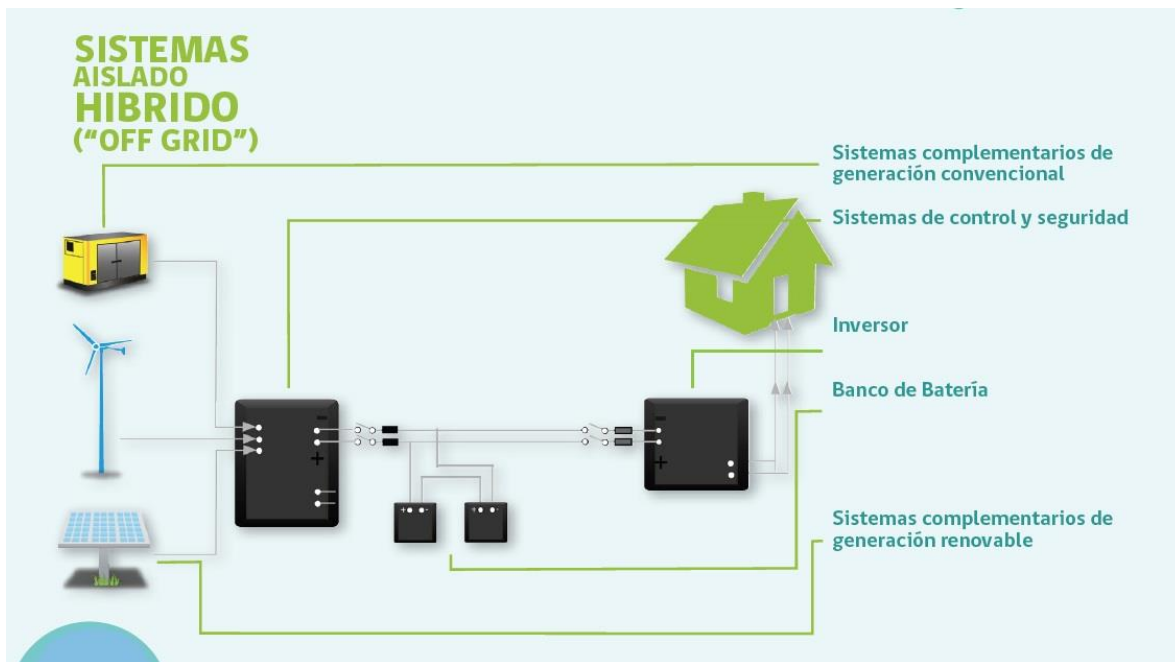
Nota. Adaptado de (Departamento de Energía, 2007).

4.2.8.4 Sistema híbrido aislado. Un sistema híbrido es un tipo de sistema aislado en el cual se utiliza una matriz de diversas tecnologías de generación para alimentar un consumo eléctrico. Típicamente, estos sistemas utilizan tecnologías de energía renovable como fotovoltaica, minihidráulica y eólica, dependiendo de la disponibilidad del recurso solar, hídrico y eólico respectivamente, así como un generador convencional en base a diésel, gasolina o gas para suplir el déficit de energía. Adicionalmente, estos sistemas utilizan un banco de baterías para el almacenamiento de la energía.

En la figura 23 se observan las partes que conformarían el sistema de conexión a la red eléctrica haciendo uso de un aerogenerador de manera aislada híbrida.

Figura 23.

Componentes de un sistema aislado híbrido



Nota. Adaptado de (Departamento de Energía, 2007).

En un sistema híbrido aislado, el control de la generación es crítico. Para maximizar la eficiencia en la operación debe priorizarse la carga de las baterías a partir de la generación de energía renovable, dado que este tipo de fuentes no tiene costo asociado a la generación, y utilizar el respaldo de energía convencional solo cuando la carga de las baterías se aproxime al límite de descarga. Los componentes de este tipo de sistemas son los mismos especificados para un sistema aislado, pero incorporando en este caso también nuevas fuentes de generación como paneles fotovoltaicos, generación minihidráulica, generación convencional, entre otras. (Departamento de Energía, 2007).

4.2.9 Software de modelado (SolidWorks)

SOLIDWORKS es un software de diseño CAD 3D (diseño asistido por computadora) para modelar piezas y ensamblajes en 3D y planos en 2D. El software ofrece un abanico de soluciones para cubrir los aspectos implicados en el proceso de desarrollo del producto. Sus productos ofrecen la posibilidad de crear, diseñar, simular, fabricar, publicar y gestionar los datos del proceso de diseño.

La labor de SOLIDWORKS en el proceso de desarrollo del producto es muy específica, las soluciones ayudan a acelerar el proceso ahorrando tiempo y dinero dando paso a la innovación de los productos.

Cuando en la mayoría de las empresas la cadena de valor es un proceso secuencial en el que necesitan terminar las fases anteriores para iniciar las nuevas, las soluciones de SOLIDWORKS permiten llevar el proceso en paralelo en lugar de secuencialmente, con el fin de ganar tiempo y poder tomar mejores decisiones empresariales creando mejores diseños.

El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en traspasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto. Posteriormente todas las extracciones (planos y ficheros de intercambio) se realizan de manera bastante automatizada.

SOLIDWORKS ofrece soluciones intuitivas para cada fase de diseño. Cuenta con un completo conjunto de herramientas que le ayudan a ser más eficaz y productivo en el

desarrollo de sus productos en todos los pasos del proceso de diseño. La sencillez que es parte de su propuesta de valor es decisiva para lograr el éxito de muchos clientes.

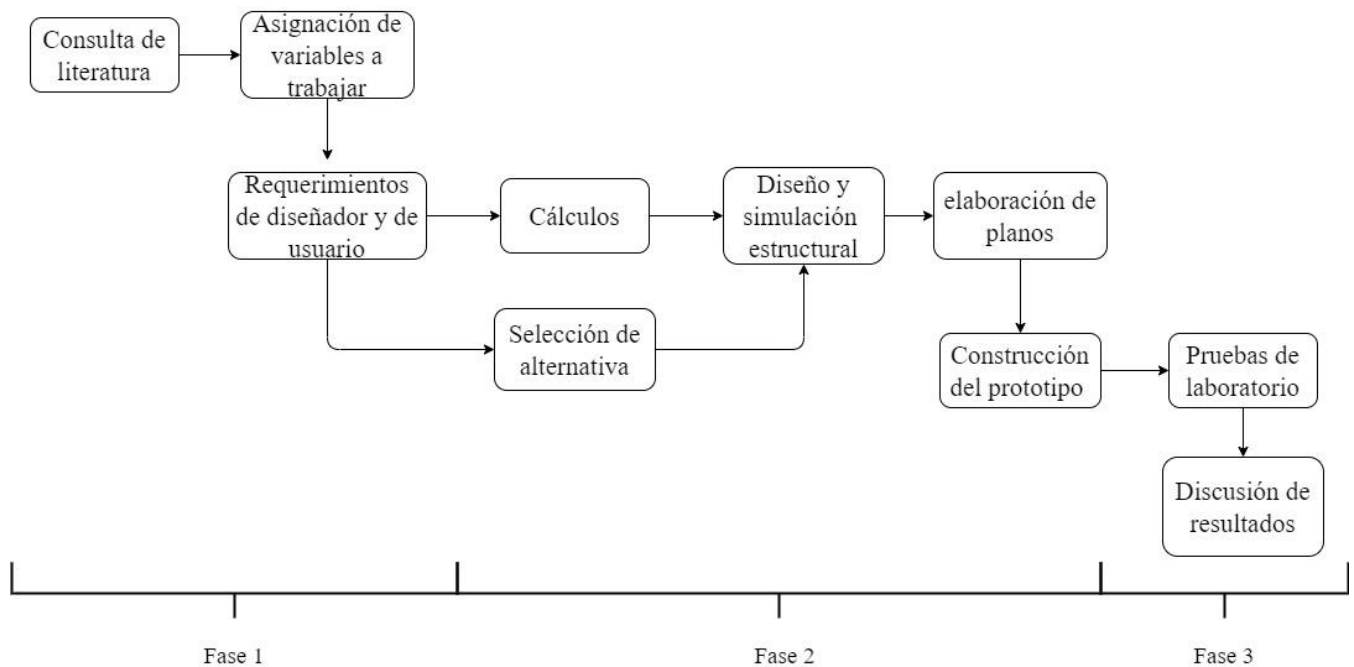
La mecatrónica, la combinación de robótica, electrónica, computadora y sistemas de control, ha dado como resultado una variedad de productos asombrosos, desde teléfonos inteligentes hasta automóviles sin conductor. Para crear esos productos, deben modelarse y desarrollarse digitalmente. SOLIDWORKS, un programa de ingeniería y diseño asistido por computadora de modelado sólido es una de las opciones de software más populares para los ingenieros de mecatrónica.

SOLIDWORKS se utiliza para desarrollar sistemas mecatrónicos de principio a fin. En la etapa inicial, el software se utiliza para planificación, ideación visual, modelado, evaluación de viabilidad, creación de prototipos y gestión de proyectos. Luego, el software se utiliza para el diseño y la construcción de elementos mecánicos, eléctricos y de software. Por último, el software se puede utilizar para la gestión, incluida la gestión de dispositivos, análisis, automatización de datos y servicios en la nube.

Los ingenieros mecánicos, eléctricos y electrónicos utilizan las soluciones de software SOLIDWORKS para formar un diseño conectado. El conjunto de programas tiene como objetivo mantener a todos los ingenieros en comunicación y capaces de responder a las necesidades o cambios de diseño. (SOLIDWORKS, 2018).

5. Metodología

A continuación, se muestra un diagrama de flujo del paso a paso para el desarrollo del proyecto.

Figura 24.*Metodología desarrollada*

Nota. Adaptados de (Autores)

Para llevar a cabo el desarrollo del diseño de la turbina eólica se tomaron en cuenta factores tales como, velocidad del viento, potencia nominal, dimensiones del rotor, los cuales se presentan a continuación.

5.1 Velocidad del viento

La velocidad promedio del viento a trabajar es de:

$$V_m = 5.9 \text{ m/s.}$$

5.2 Potencia nominal

Hay que considerar las diferentes pérdidas a las cuales está expuesto el mecanismo tales como la fricción entre piezas, por tal motivo se calcula el rendimiento total que dispondría el mecanismo.

Para el rendimiento mecánico se asume un valor del 95%, consideramos también un rendimiento eléctrico del 85%, para el coeficiente de potencia haciendo uso de la figura 15 definimos este valor:

$$C_p = 0.4$$

La eficiencia total se puede determinar mediante la ecuación:

$$\eta_t = \eta_e * \eta_m * C_p \quad (5.1)$$

$$\eta_t = 0.85 * 0.95 * 0.35$$

$$\eta_t = 0.2826$$

Se desea que la potencia útil por hora entregada por la turbina eólica sea de:

$$P_u = 80 \text{ W}$$

Por tal motivo se tiene que la potencia nominal será:

$$P_n = \frac{P_u}{\eta_T} \quad (5.2)$$

$$P_n = \frac{80}{0.2826} P_n = 283 \text{ W}$$

$$Kwh/dia = \frac{P_u * horas}{1000}$$

$$Kwh/dia = \frac{80 \text{ W} * 24 \text{ horas}}{1000}$$

$$P_{u/dia} = 1.92 \text{ Kwh/dia}$$

5.3 Dimensiones del rotor

Definida la velocidad de operación y calculada la potencia de diseño se establecen parámetros geométricos y de operación para seguir con el desarrollo de los cálculos, para ello haciendo uso de la siguiente ecuación hallaremos el área necesaria:

$$Pn = \frac{1}{2} * \rho * A * V_m^3 \quad (5.3)$$

Donde:

$$Pn = \text{Potencia nominal [W]}$$

$$\rho = \text{Densidad del aire [Kg/m}^3\text{]}$$

$$A = \text{Área de barrido [m}^2\text{]}$$

$$V_m = \text{Velocidad del flujo de viento [m/s]}$$

Asumiendo una densidad del aire de $\rho = 1.22 \text{ Kg/m}^3$, con lo cual se tiene que:

$$A = \frac{2 * Pn}{\rho * V_m^3} \quad (5.4)$$

$$A = \frac{2 * 310}{1.22 * 5.9^3}$$

$$A = 2.75 \text{ m}^2$$

El área de barrido corresponde al tamaño de la turbina eólica y teniendo en cuenta a la disposición del generador se hace uso de la relación:

$$A = D * H \quad (5.5)$$

Donde

$$A = \text{Área de barrido [m}^2\text{]}$$

$$D = \text{Diametro del rotor [m]}$$

$$H = \text{Altura del rotor [m]}$$

5.3.1 Relación de velocidad de punta (TSR)

Conocida como “Tip speed ratio”, es la relación que hay entre la velocidad tangencial de la punta de una pala y la velocidad real del viento, esta relación está dada por la ecuación:

$$TSR = \frac{\omega * r}{v} \quad (5.6)$$

Donde:

$$\omega = \text{Velocidad angular [rad/s]}$$

$$r = \text{radio del rotor [m]}$$

$$v = \text{velocidad del viento [m/s]}$$

Tomando de la Figura 15 utilizando el $C_p = 0.4$ y como se está haciendo uso del generador tipo Darrieus tomamos un valor de $TSR = 4$, teniendo en cuenta estos valores podemos calcular la velocidad angular.

Se tiene que:

$$\omega = \frac{TSR * v}{r}$$

Se conoce que:

$$n = \frac{60 * \omega}{2 * \pi} \quad (5.7)$$

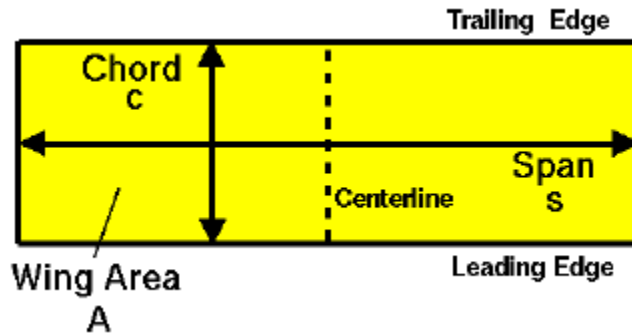
5.3.2 Relación de aspecto del álabe (ar)

Es una medida de lo largo y delgado que es un ala de punta a punta. La relación de aspecto de un ala se define como el cuadrado del tramo dividido por el área del ala y se le asigna el símbolo AR. Para un ala rectangular, esto se reduce a la relación entre el tramo y la longitud de la cuerda.

En la figura 25 se observa cómo es la relación de aspecto del álabe (ar).

Figura 25.

Vista superior relación aspecto de ala



Nota. Adaptado de (Geometry definition Nasa, 2021).

$$AR = \frac{L}{c} \quad (5.8)$$

Donde:

$L =$ Longitud del álabe [m]

$c =$ Perfil de la cuerda [m]

Para el desarrollo del proyecto asumimos un valor para la relación de aspecto del álabe $BAR = 8$ y teniendo en cuenta que la solidez σ representa la relación entre el área de barrido y el área de los álabes por tal motivo asumimos un valor de $\sigma = 0.42$ y haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{N \cdot c \cdot L}{A} = \frac{N \cdot c}{D} \quad (5.9)$$

Donde:

$\sigma =$ Solidez

$N =$ Número de álabes

$$c = \text{Perfil de la cuerda [m]}$$

$$D = \text{Diámetro del rotor [m]}$$

$$L = \text{Longitud del álabo [m]}$$

$$A = \text{Área de barrido [m}^2\text{]}$$

Para la realización de cálculos y pruebas del prototipo se tomó un número de álabes de $N = 3$.²

Haciendo uso del Software EES se realizaron los reemplazos de las ecuaciones anteriormente vistas y esto arrojó los siguientes valores:

$$A = 2.756 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$c = 0.2196 \text{ [m]}$$

$$D = 1.569 \text{ [m]}$$

$$r = 0.7845 \text{ m}$$

$$h = 1.757 \text{ [m]}$$

$$\omega = 37.61 \text{ [rad/s]}$$

$$n = 359 \text{ [rpm]}$$

$$L = 1.751 \text{ [m]}$$

5.3.3 Cálculo del torque

Para el cálculo del torque se utilizó la siguiente ecuación:

$$T = \frac{P_n}{\omega} \quad (5.10)$$

Tomando los valores calculados previamente si tiene que:

$$T = \frac{283.1 \text{ W}}{37.61 \text{ rad/s}}$$

$$T = 7.527 \text{ N} - \text{m}$$

5.3.4 Perfil aerodinámico

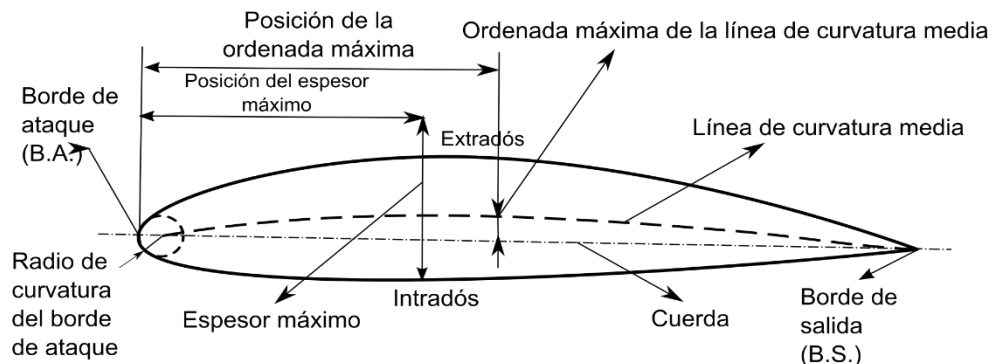
Para el desarrollo del prototipo se tomó en cuenta el uso de dos perfiles ya probados con la finalidad de evaluar el rendimiento que estos tendrán durante la fase de pruebas, con este tipo de selección se busca aprovechar las capacidades que cada uno puede brindar en busca del máximo aprovechamiento de las corrientes de aire, los perfiles utilizados fueron:

Perfil DU06-W-200

- Perfil Savonius

El perfil aerodinámico se compone de las siguientes partes. En la figura 26 se observa cómo es la nomenclatura de un perfil aerodinámico.

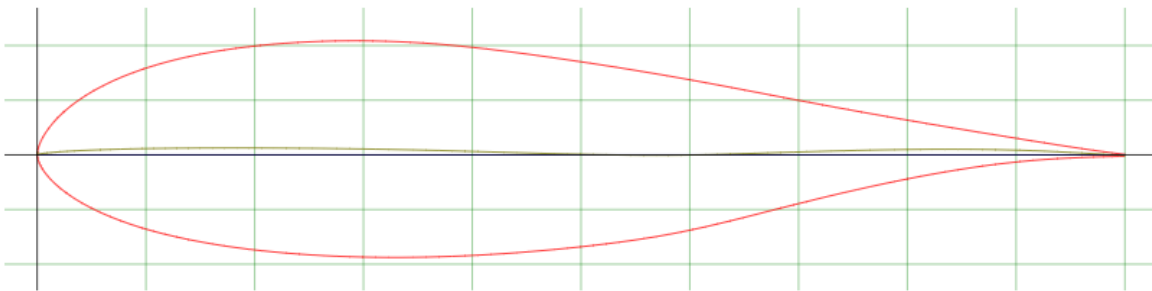
Figura 26. Nomenclatura de perfil aerodinámico



Nota. Adaptado de (Luque, S. A. C, 2014)

Teniendo en cuenta los perfiles utilizados se tiene los siguiente:

El perfil aerodinámico DU06-W-200 (ver figura 27) fue diseñado para usarse con VAWT pequeños, es de perfil asimétrico. Una de las ventajas de este perfil aerodinámico es que aumenta el rendimiento del rotor al arrancar en valores bajos de TSR (a baja velocidad del rotor, alivia el arranque que es un problema común en los VAWT), (Nawfal M Ali,2019).

Figura 27.*Perfil DU06-W-200*

Nota. Adaptado de (Airfoil tools)

Para el diseño y construcción del perfil tipo Savonius se utilizó la teoría y metodología que se expone según Menet, J.-L. (2004) explica:

El rotor Savonius es un concepto muy simple que a menudo se ha construido y utilizado con éxito a partir de bidones de aceite. Está hecho con dos medios cilindros (nominal diámetro D , altura H), todo el rotor girando alrededor de un eje vertical, como se muestra en la Fig. 28. El movimiento es principalmente el resultado de la diferencia entre el arrastre de la paleta que avanza y el arrastre de la otra. Aunque la eficiencia del rotor Savonius básico es relativamente baja, hay una serie de parámetros geométricos que afectan esta eficiencia. Entre esos parámetros, la relación de aspecto representa la altura del rotor en relación con su diámetro, este es un criterio muy importante para el rendimiento aerodinámico de un rotor Savonius:

$$\alpha = \frac{H}{D} \quad (4)$$

Globalmente, valores altos del parámetro α debería mejorar enormemente esta eficiencia. Valores de α alrededor de 4.0 parece conducir al mejor coeficiente de potencia para un rotor Savonius convencional. Se sabe

que las placas de extremo conducen a mejores prestaciones aerodinámicas. La influencia del diámetro D_f de estas placas terminales en relación con el diámetro D del rotor ha sido estudiado experimentalmente. El valor más alto del coeficiente de potencia es obtenido por un valor de D_f alrededor del 10% más que D , cualquiera que sea el coeficiente de velocidad.

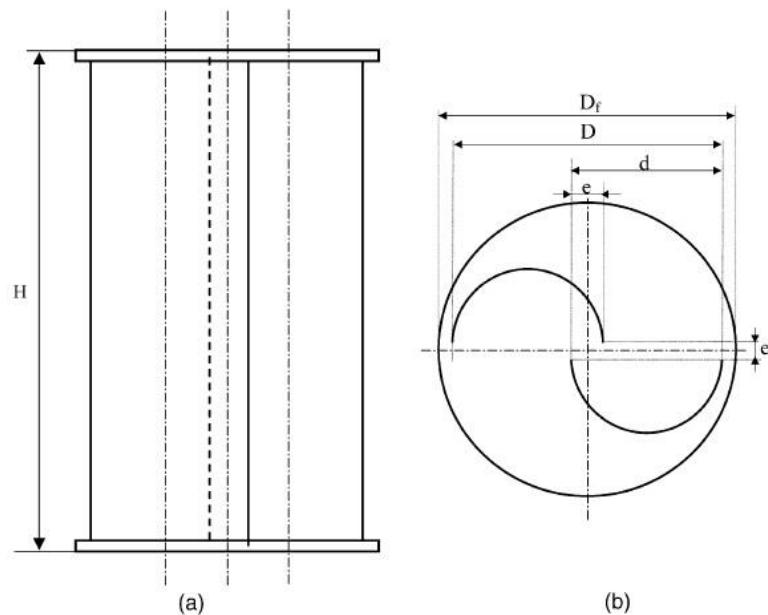


Figura 28. Esquema de un rotor Savonius de un solo paso. (a) Vista frontal; (b) vista superior (rotor Savonius convencional: $e' = 0$)

La influencia de la relación de superposición β dado en la siguiente ecuación:

$$\beta = \frac{e}{d} \quad (5)$$

dónde e es la superposición (Fig. 28) y d es el diámetro de cada cilindro que constituye las paletas (cuerda). Las mejores eficiencias se obtienen para valores de β entre el 20 y el 30%. No es necesario crear otra

brecha de separación e' entre las paletas, que consistiría en quitar la cuerda de las paletas del diámetro del rotor (Fig. 28): por el contrario, el coeficiente de potencia y el coeficiente de par disminuyen cuando el espacio de separación e' es superior a cero. También se ha estudiado el número de palas, pero los resultados parecen señalar mejores rendimientos para el rotor Savonius de dos palas, ya sea en relación con el coeficiente de par obtenido o el coeficiente de potencia. Pero con respecto a la paleta en sí, no se ha encontrado un estudio para estimar la influencia del grosor de la paleta, e_p . Los rendimientos aerodinámicos esperados son los que podemos ver en la Figura 4. Estas curvas experimentales se han obtenido con lo que se denomina el rotor Savonius óptimo, para el cual la relación de superposición β es igual a $1/6$ (sin eje entre las paletas). Esta configuración debería permitir obtener el mejor coeficiente de potencia, pero si hubiéramos considerado solo el par de arranque, deberíamos haber visto que, para algunas direcciones de la velocidad del viento, este par de arranque sería tan bajo que el rotor no podría arrancar solo. Es la razón por la que muchos autores han optado por utilizar un rotor Savonius de doble paso, donde los pares de paletas superior e inferior se establecen en 90° el uno al otro. En cualquier caso, se dice que el rotor de doble paso es ligeramente superior a la turbina de un solo paso correspondiente (rotor Savonius convencional) tanto en características de par como de potencia.

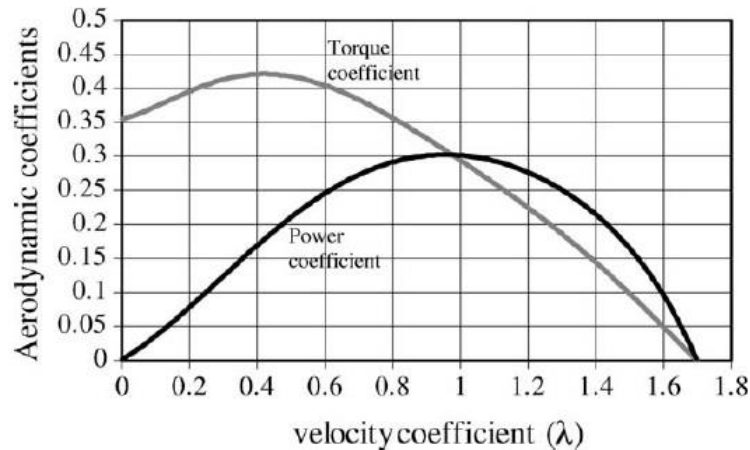


Figura 29. Rendimiento aerodinámico esperado para un rotor Savonius óptimo

3. Procedimiento de diseño del actual prototipo de rotor Savonius

3.1. Elección de la geometría (Figura 30)

En la sección 2 se vio cuál debería ser la geometría óptima de un rotor Savonius, lo que conduce a los rendimientos esperados de la Figura 29. Para mejorar la rigidez total del rotor, se ha optado por utilizar un eje central para el rotor (diámetro a), y las dimensiones del prototipo se han adaptado para tener en cuenta este hecho. En particular, debemos elegir un valor apropiado para la relación de superposición β . Ahora, la definición dada en la ecuación (5) se ha modificado para tener en cuenta la influencia del eje; entonces usamos la siguiente expresión por β (Figura 6a):

$$\beta = \frac{r_a - a}{d_i} \quad (6)$$

dónde r_a es la superposición. Notemos que la ecuación (6) conduce a la expresión dada en ecuación (5) cuando $\alpha = 0$, es decir, cuando no hay eje dentro del rotor.

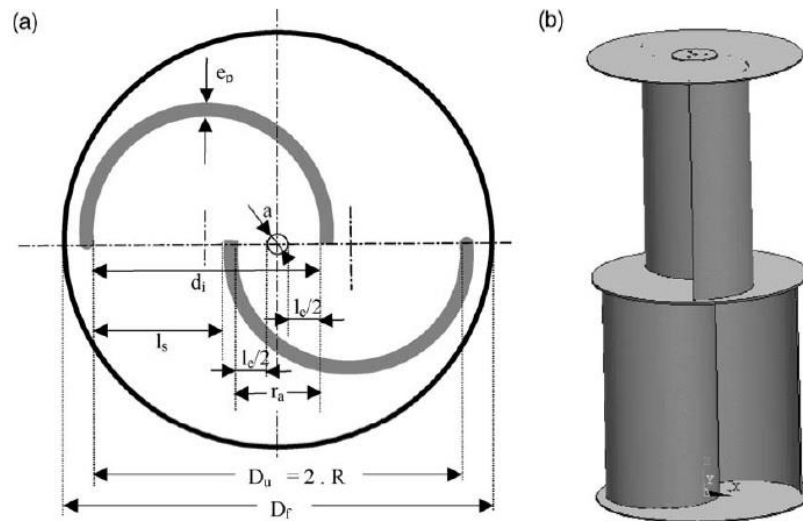


Figura 30. Esquema del presente prototipo

Hemos visto en la Sección 2 que la mejor eficiencia de un rotor Savonius se obtiene para los valores de la relación de superposición β entre el 20 y el 30%. Con un valor de β de $1/6$, la superficie de flujo que sale del rotor después de haberlo hecho girar es cinco veces mayor que el que entra "dentro" del rotor (entre las dos palas).

Hay que considerar unos aspectos importantes durante el uso de los perfiles aerodinámicos y son los coeficientes de sustentación y coeficiente de resistencia ya que estos dependen del perfil utilizado. A continuación, se presenta la nomenclatura para cada coeficiente.

C_l = coeficiente de sustentación.

C_d = coeficiente de resistencia.

Para el uso de estos coeficientes tomaremos como referencia los siguientes valores:³

$$C_l = 0.876$$

$$C_d = 0.0853$$

Definiendo un número de Reynolds $Re = 1.19 \times 10^5$

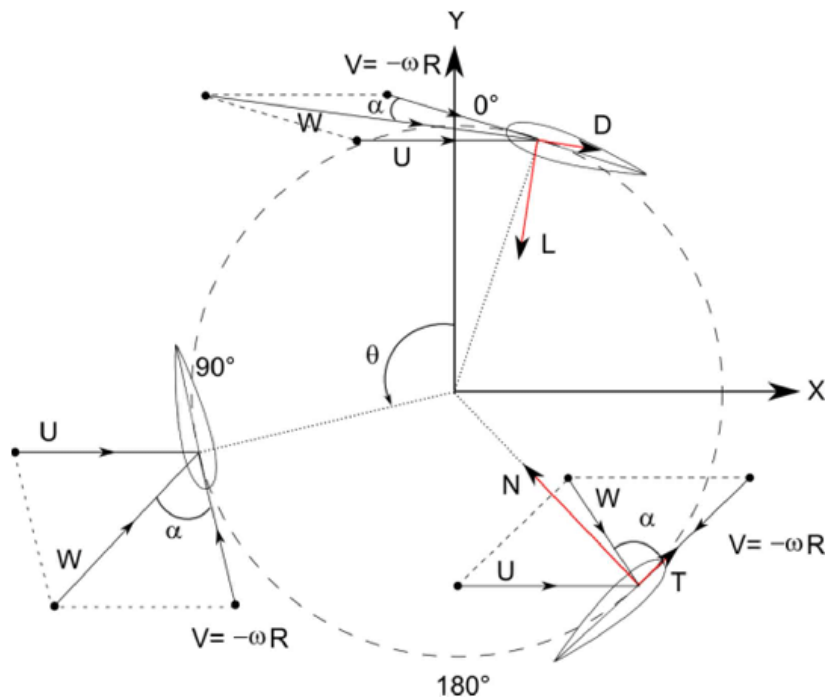
6. Cálculo de fuerza de sustentación, arrastre y resultante

En este apartado se analizó el comportamiento de las fuerzas actuantes sobre las palas del aerogenerador, para ellos debemos analizar cómo es el comportamiento de los vectores velocidad y fuerza en las palas.

En la figura 31 se observa el diagrama de velocidades a las cuales estaría siendo sometido el perfil de hélice al momento de estar rotando.

Figura 31.

Velocidades actuantes en la hélice



Nota. Adaptado de (Ramírez Tovar, 2018)

$$W = U + \omega * R \quad (6.1)$$

$W =$ Velocidad de los álabes [m/s]

$U =$ Velocidad del viento [m/s]

$$\omega * R = \text{Velocidad relativa [m/s]}$$

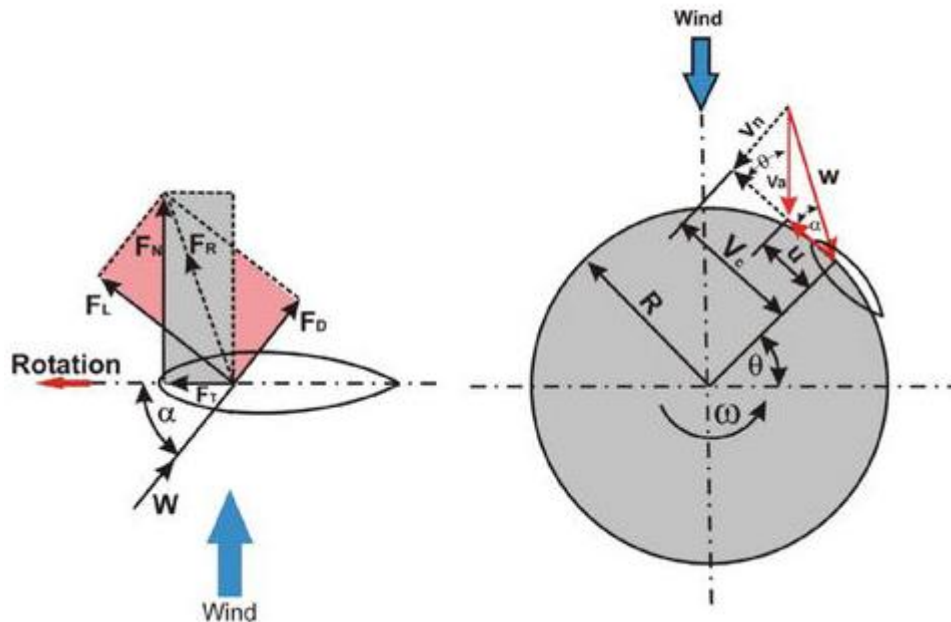
$$\theta = \text{Ángulo de azimut } [^\circ]$$

$$\alpha = \text{Ángulo de ataque } [^\circ]$$

En la figura 32 se observa el diagrama de como interactúan la fuerza de sustentación y la fuerza de arrastre en un perfil de hélice con respecto al ángulo de ataque α incidente.

Figura 32.

Fuerzas actuantes



Nota. Adaptado de (García Rodríguez, 2021)

Con el análisis de la figura 32 podemos calcular las fuerzas actuantes sobre el perfil además de ellos, se sabe que el valor del ángulo de ataque a utilizar es de $\alpha = 10$ por lo cual se tiene lo siguiente:

$$Fd = \frac{1}{2} * Cd * \rho * c * l * W^2 \quad (6.2)$$

$$Fl = \frac{1}{2} * Cl * \rho * c * l * W^2 \quad (6.3)$$

$$F_t = \frac{1}{2} * C_t * \rho * c * l * W^2 \quad (6.4)$$

$$F_n = \frac{1}{2} * C_n * \rho * c * l * W^2 \quad (6.5)$$

$$C_t = C_l * \text{sen}(\alpha) - C_d * \text{cos}(\alpha) \quad (6.6)$$

$$C_n = C_l * \text{cos}(\alpha) + C_d * \text{sen}(\alpha) \quad (6.7)$$

Donde

$F_d =$ Fuerza de arrastre.

$F_l =$ Fuerza de sustentación.

$F_t =$ Fuerza tangencial.

$F_n =$ Fuerza normal.

$C_t =$ Coeficiente fuerza tangencial.

$C_n =$ Coeficiente fuerza normal.

A continuación, se muestran los cálculos desarrollados para cada una de las fuerzas actuantes

De la ecuación 6.1 obtenemos:

$$W = U + \omega * R$$

$$W = 5.9 \text{ m/s} + 39.72 \text{ rad/s} * 0.7427 \text{ m}$$

$$W = 35.4 \text{ m/s}$$

Con este valor y los previamente calculados, reemplazamos en las ecuaciones 6.2 y 6.3 teniendo los siguientes resultados:

$$F_d = \frac{1}{2} * C_d * \rho * c * l * W^2$$

$$F_d = \frac{1}{2} * 0.0853 * 1.22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0.208 \text{ m} * 1.6 \text{ m} * (35.4 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2$$

$$F_d = 264.8 \text{ N}$$

$$Fl = \frac{1}{2} * Cl * \rho * c * l * W^2$$

$$Fl = \frac{1}{2} * 0.876 * 1.22 \frac{kg}{m^3} * 0.208 m * 1.6 m * (35.4 \frac{m}{s})^2$$

$$Fl = 25.78N$$

De la figura 32 podemos observar que la fuerza resultante a la cual estaría sometido el perfil el álabe será:

$$Fr = \sqrt{Fd^2 + Fl^2} \quad (6.8)$$

$$Fr = \sqrt{(264.8 N)^2 + (25.78 N)^2}$$

$$Fr = 266 N$$

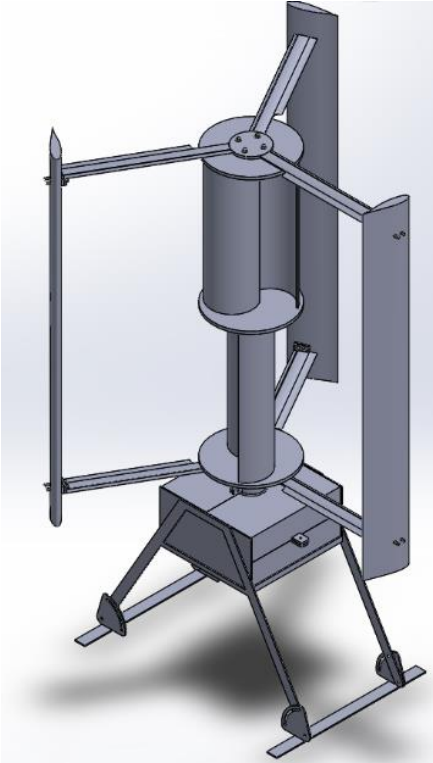
7. Selección de alternativa

A continuación, se aborda el proceso que se tomó en cuenta a la hora de realizar la mejor selección de prototipo para ello se desarrollaron 3 propuestas de diseño las cuales son:

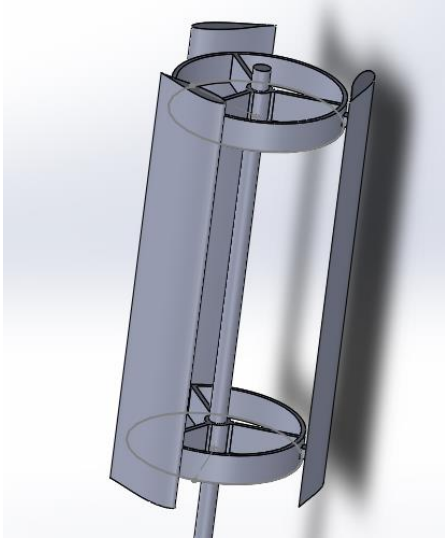
Alternativa 1: Dispositivo compuesto de 3 hélices rectas tipo DU06-W-200 sujetas por medio de dos brazos aerodinámicos y un rotor de doble etapa tipo Savonius por medio del cual brinda un arranque a una menor velocidad de viento. Cabe resaltar que esta alternativa no lleva eje debido a que al estar hueco el rotor Savonius se capta más la energía del viento.

Alternativa 2: Dispositivo compuesto de 3 hélices rectas tipo DU06-W-200 sujetas por medio de dos aros soporte, permitiendo trabajar a altas velocidades de viento, pero no a bajas.

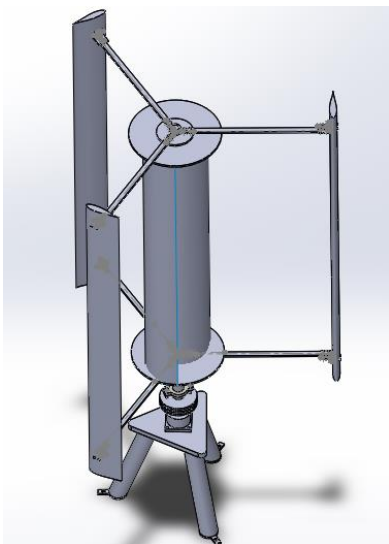
Alternativa 3: Dispositivo compuesto de 3 hélices rectas tipo DU06-W-200 sujetas por medio de dos brazos y un rotor simple Savonius, esta disposición le permite trabajar a bajas velocidades de viento, pero al ser un rotor Savonius de una sola etapa este no es capaz de captar la energía del viento desde cualquier dirección.

Figura 33.*Alternativa 1*

Nota. Adaptado de (Autores)

Figura 34.*Alternativa 2*

Nota. Adaptado de (Autores)

Figura 35.*Alternativa 3*

Nota. Adaptado de (Autores)

7.1 Requerimiento del consumidor

A continuación, se presentan los requerimientos más importantes que el cliente tendrá en cuenta a la hora de utilizar el aerogenerador.

Tabla 4.

Especificaciones del cliente

Especificaciones del cliente	Orden de importancia
Eficiente	13
Económico	12
Tamaño	11
Peso	10
Fácil construcción	9
Mantenimiento	8
Seguridad	7
Resistente	6
Repuestos	5
Adaptabilidad	4
Ruido	3
Transporte	2
Estética	1

Nota. Adaptado de (Autores)

7.2 Requerimiento del diseño

A continuación, se presentan las variables que se consideran más importantes a la hora de diseñar el prototipo del aerogenerador.

- Producción energética
- Material
- Desarmable
- Fácil arranque
- Aerodinámico
- Dimensiones
- Horas de operación

7.3 Criterio de ponderación y selección

Para realizar la matriz QFD se tiene como criterio para llevarla a cabo los siguientes valores

- 0 = Sin relación
- 1 = Muy poca relación
- 3 = Relacionado
- 9 = Totalmente relacionado

Tabla 5.*Matriz QFD*

Selección de prioridades			Alternativas de diseño													
			Producción de energía		Material		Desarmable		Fácil arranque		Aerodinámico		Dimensiones		Horas de operación	
Especificaciones del cliente	Eficiente	13	9	117	9	117	1	13	9	117	9	117	9	117	9	117
	Económico	12	9	108	9	108	3	36	3	36	9	108	9	108	1	12
	Tamaño	11	9	99	3	33	9	99	9	99	9	99	9	99	3	33
	Peso	10	9	90	9	90	3	30	9	90	1	10	1	10	3	30
	Fácil construcción	9	0	0	9	81	9	81	9	81	3	27	9	81	0	0
	Mantenimiento	8	3	24	3	24	9	72	1	8	3	24	3	24	9	72
	Seguridad	7	1	7	3	21	3	21	9	63	3	21	3	21	9	63
	Resistente	6	3	18	9	54	3	18	3	18	3	18	3	18	9	54
	Repuestos	5	1	5	9	45	9	45	1	5	3	15	3	15	9	45
	Adaptabilidad	4	3	12	1	4	3	12	9	36	3	12	3	12	1	4
	Ruido	3	1	3	3	9	0	0	3	9	9	27	9	27	3	9
	Transporte	2	0	0	1	2	9	18	0	0	0	0	9	18	0	0
Estética	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	9	9	0	0	
Suma total			483		588		446		562		478		559		439	

Nota. Adaptado de (Autores).

Tabla 6.*Alternativa ganadora*

Prioridades	Porcentaje	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
Dimensiones	36%	5	1,8	5	1,8	5	1,8
Material	33%	4	1,32	3,5	1,155	4,5	1,485
Fácil arranque	31%	5	1,55	3,5	1,085	3,5	1,085
Mejor propuesta		4,67		4,04		4,37	

Nota. Adaptado de (autores).

En la tabla 6 se observan los criterios más importantes a tomar en cuenta para la alternativa a seleccionar y en base a estos valores la alternativa 1 fue la ganadora.

8. Diseño aerogenerador

En este apartado se encontrará lo relacionado a la propuesta de construcción del generador eólico en condiciones de campo.

8.1 Selección de materiales

Para esto se subdividió el generador en varias secciones tomando en cuenta la facilidad de obtención de estos para realizar su proceso de fabricación, mencionado lo anterior se tiene que:

8.1.1 Bastidor, brazos y eje

El material seleccionado para estas piezas fue acero 1020 estirado en frío ya que su módulo de elasticidad lo hace un material bastante resistente, además de que su costo en el mercado es más bajo, y los que se busca precisamente en estas piezas es que tenga una durabilidad alta. A continuación, en la tabla 7, se presentan las propiedades mecánicas del mencionado material:

Tabla 7.*Propiedades mecánicas del acero AISI 1020 laminado en frío*

Propiedades mecánicas	AISI 1020 laminado en frío
Resistencia a la tracción	420 MPa
Fuerza de producción	350 MPa
Módulo de elasticidad	205 GPa
Módulo de corte (típico del acero)	80 GPa
el coeficiente de Poisson	0.29
Alargamiento a la rotura (en 50 mm)	0.15
Dureza, Brinell	121
Dureza, Knoop (convertido de dureza Brinell)	140
Dureza, Rockwell B (convertido de dureza Brinell)	68
Dureza, Vickers (convertido de dureza Brinell)	126
Maquinabilidad (basado en acero AISI 1212. Como maquinabilidad 100)	65

Nota. Adaptado de (Waldunsteel)

8.1.2 Rotor Savonius

El material seleccionado para el rotor fue aleación de aluminio 1060 ya que al ser un material con una densidad baja eso ocasiona que su peso disminuya logrando así que el rotor tenga un menor peso, aprovechando que este tipo de rotor inicia su funcionamiento a muy bajas velocidades de viento. A continuación, en la tabla 8, se presentan las propiedades mecánicas del mencionado material:

Tabla 8.

Propiedades mecánicas de aleación de aluminio 1060

PROPIEDADES MECÁNICAS	ALUMINIO 1060
Resistencia a la tracción	5,5
Kg/mm ²	
Limite elástico al 0,2 %	3
Kg/mm ²	
Alargamiento or % 50 mm	40
Modulo elasticidad	7
Kg/mm ²	
Densidad Kg/m ³	2,7
Tensión de rotura al corte	6
Kg/mm ²	
Conductividad térmica	0,53
W/cm.k a 25°C	
Coefficiente de dilatación	23,6
(10-mm/°C)	

Nota. Adaptado de (Madecentro)

8.1.3 Perfil DU06-W-200

El material seleccionado para el perfil DU06-W-200 fue polímero ABS, ya que se busca probar nuevas alternativas de materiales y este en específico al ser un material que se puede obtener a raíz del reciclaje y que, pese a ser un polímero posee un módulo de elasticidad elevado haciendo bastante resistente y muy ligero, ayudando así a que las hélices puedan rotar con mayor facilidad. A continuación, en la tabla 9, se presentan las propiedades mecánicas del material anteriormente mencionado:

Tabla 9.

Propiedades mecánicas del polímero ABS

PROPIEDADES MECÁNICAS POLIMERO ABS	
Módulo de elasticidad (KN/mm ²)	2,3
Impacto NOTCH (N/mm ²)	70
Resistencia al corte (Kj/m ²)	12
3,5% flexión de tensión (N/mm ²)	65
Conductividad térmica (W/KM)	0,17
Temperatura de distorsión de calor (°C)	96

Nota. Adaptado de (SUPERTRONIC S.A)

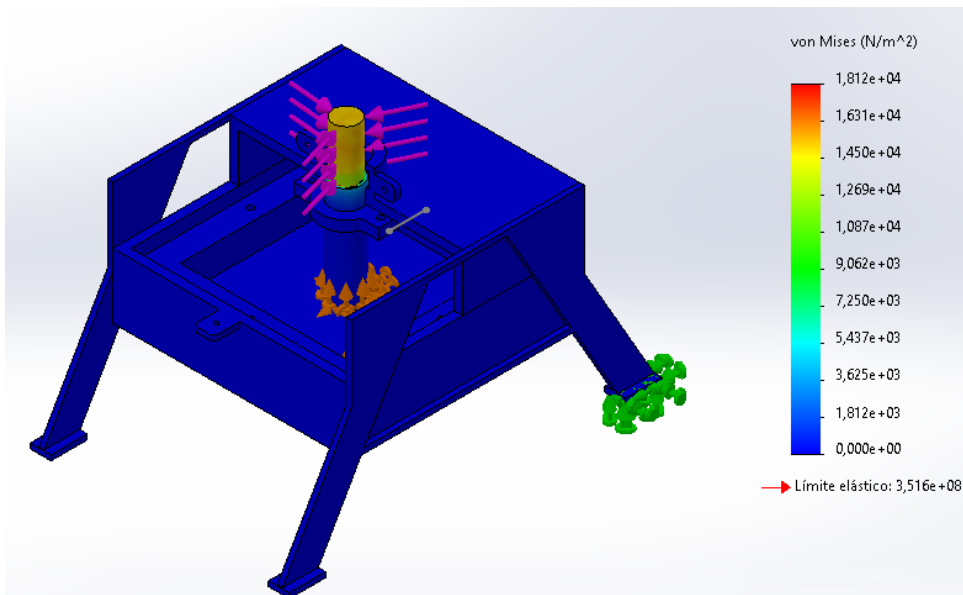
8.2 Simulación de esfuerzos del aerogenerador

Definidos los materiales del generador se procedió a realizar los análisis de esfuerzos utilizando el software SolidWorks el cual arrojó los siguientes valores:

Para el bastidor y eje se tiene que:

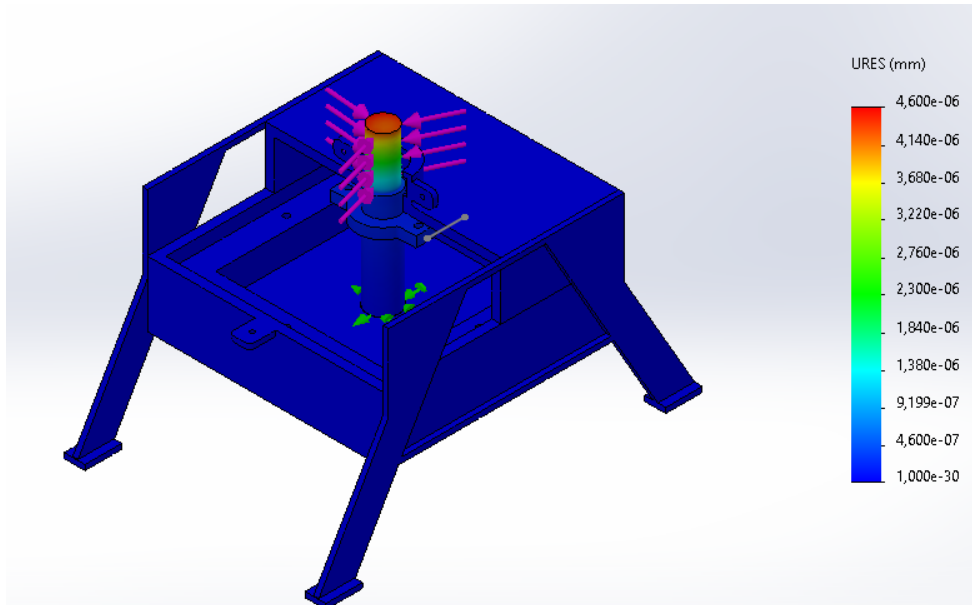
Figura 36.

Análisis de esfuerzo del eje



Nota. Adaptado de (Autores)

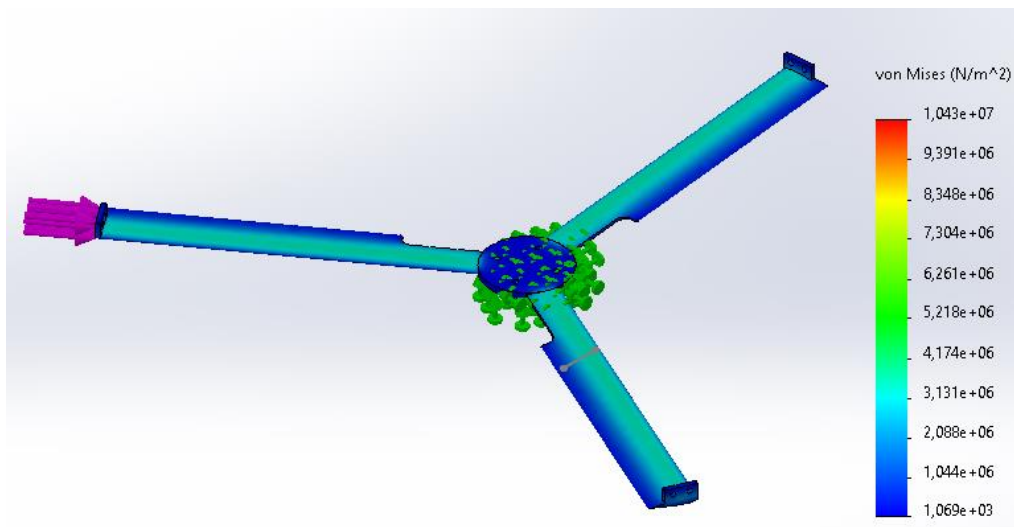
De la figura 36 se observa que el esfuerzo generado por la fuerza resultante $F_r = 266 \text{ N}$ al que estaría sometido el eje de acero AISI 1020 estirado en frío no alcanza a pasar el límite elástico del mencionado material pese a que en su escala de color este se encuentre algo elevado.

Figura 37.*Desplazamiento*

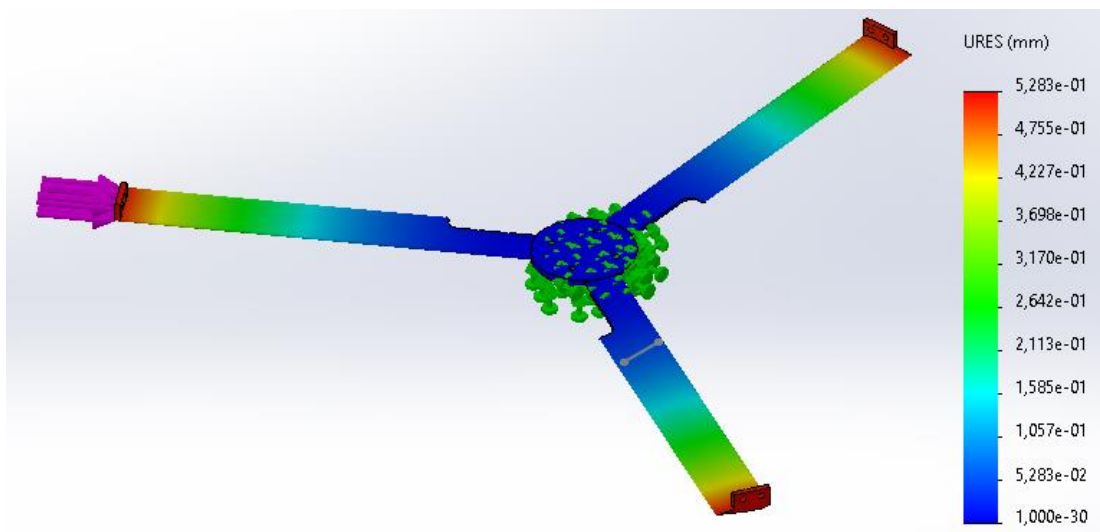
Nota. Adaptado de (Autores)

De la figura 37 se observa que el desplazamiento al cual estará sometido el eje es muy inferior siendo mencionado valor máximo de $0,000046 \text{ mm}$, considerándose casi un cero.

Para los brazos se tiene que:

Figura 38.*Análisis de esfuerzo de los brazos*

Nota. Adaptado de (Autores)

Figura 39.*Desplazamiento*

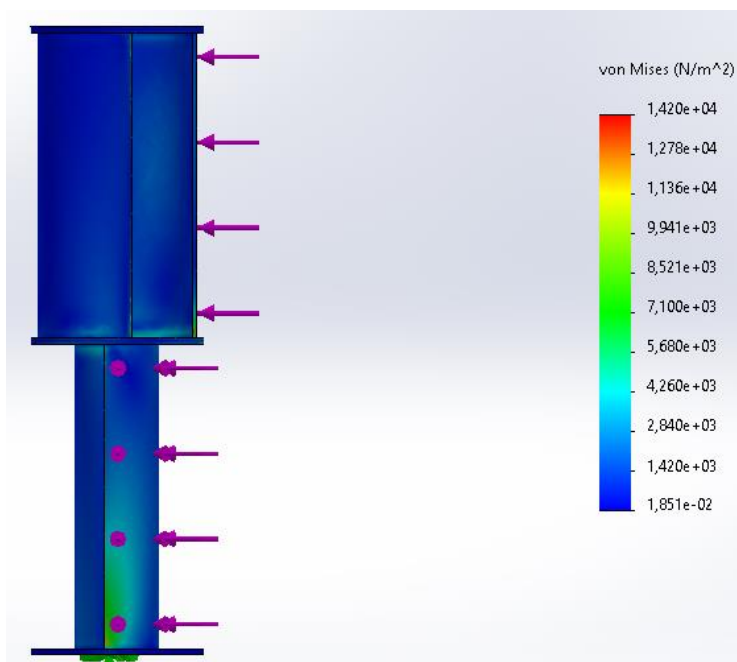
Nota. Adaptado de (Autores)

De la figura 38 se observa que la carga a la cual estarían sometidos los brazos producto de la interacción de la fuerza resultante $F_r = 266 \text{ N}$ cuyo material es de acero AISI 1020 estirado en frío no supera el límite elástico pese a la geometría que este tiene, de la figura 39 se observa que el desplazamiento al cual están sometidos los brazos es de aproximadamente 0.6 mm siendo este valor muy pequeño.

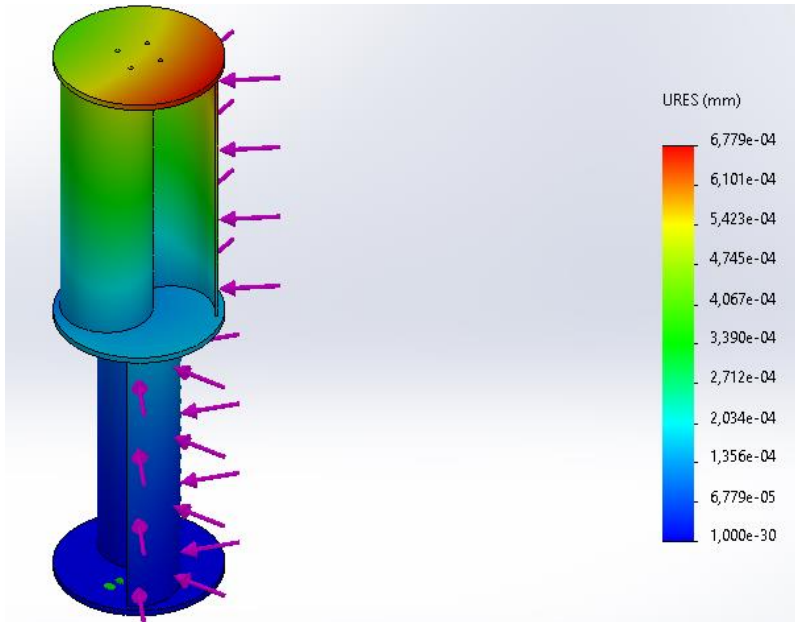
Para el rotor savonius se tiene que:

Figura 40.

Análisis de esfuerzo del rotor Savonius



Nota. Adaptado de (Autores)

Figura 41.*Desplazamiento*

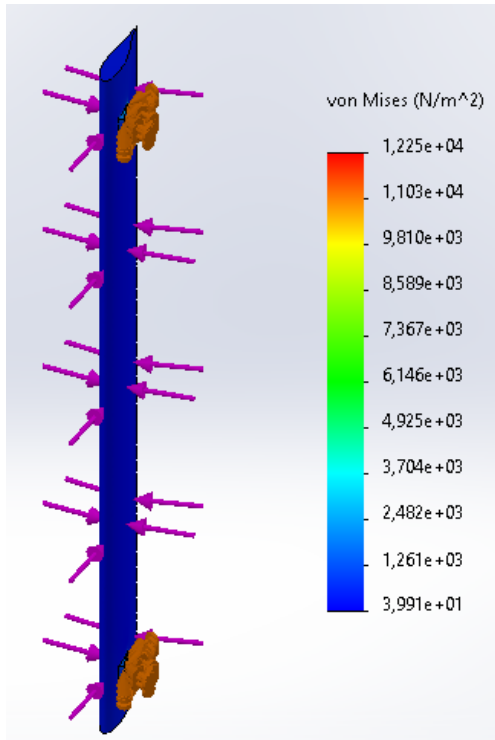
Nota. Adaptado de (Autores)

De la figura 40 se observa que las cargas a las cuales se somete el rotor Savonius producto de la interacción de la fuerza resultante $F_r = 266 \text{ N}$, cuyo material es una aleación de aluminio 1060 se encuentran dentro del límite elástico ya que donde se presenta el mayor valor de esfuerzo está en 8520 N/m^2 , por lo cual lo hace muy resistente pese a ser un material más ligero, y de la figura 41 se observa que el desplazamiento máximo al cual estará sometido el rotor Savonius es muy pequeño siendo el valor máximo de $0,0006779 \text{ mm}$ el cual se podría considerar un cero.

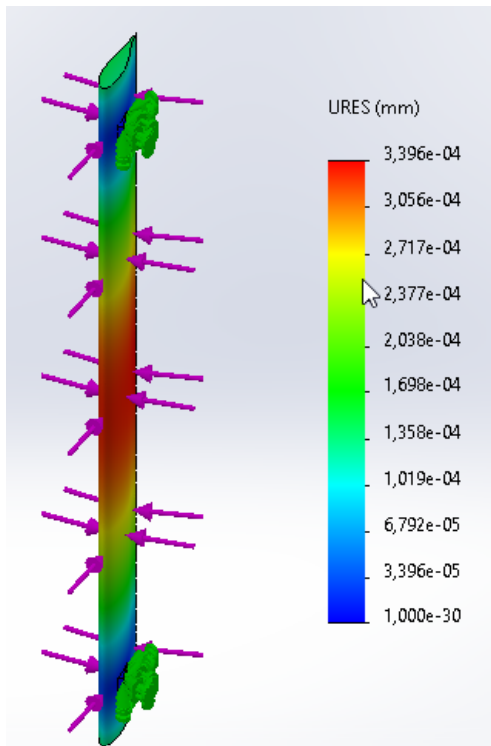
Del perfil DU06-W-200 se tiene que:

Figura 42.

Análisis de esfuerzo del perfil DU06-W-200



Nota. Adaptado de (Autores)

Figura 43.*Desplazamiento*

Nota. Adaptado de (Autores)

De la figura 42 se observa que el esfuerzo provocado por la fuerza resultante $F_r = 266$ N, al cual estarían sometidos los álabes cuyo material es polímero ABS y se encuentran dentro del límite de elasticidad dando como valor máximo de esfuerzo 8589 N/m², el cual los hace altamente resistentes, y de la figura 43 se observa que el desplazamiento máximo al cual estarían sometidos los álabes son muy pequeñas siendo el valor máximo de 0.0003396 mm el cual se podría aproximar a cero.

9. Diseño sistema de conversión de energía

Para efectos de practicidad se propone la fabricación casera de un generador de flujo axial haciendo uso de imanes de neodimio, dichos imanes serán ubicados en los discos de los rotores, logrando generar un campo magnético con el estator con la finalidad de producir una corriente eléctrica. Las características de estos imanes se presentan en la tabla 10.

Tabla 10.

Características imán NdFeB

Características	
Grado	N35
Remanence (Kilo Gauss)	11,7 - 12,2
Fuerza del Coercivity (kA/m)	≥ 868
Fuerza coactiva intrínseca (kOe)	≥ 12
Producto máximo de la energía (kJ/m ³)	263 - 287
Temperatura de funcionamiento máximo (°C)	80

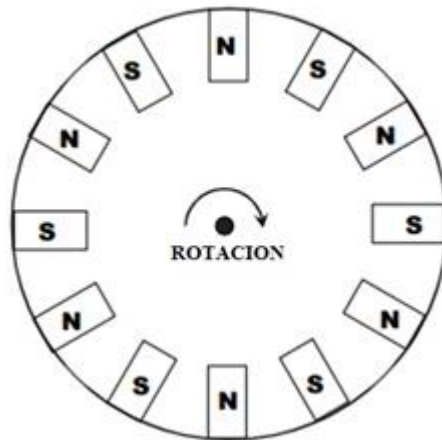
Nota. Adaptado de (Jinmag)

Para efectos de selección se tomó un imán con dimensiones de 60 x 30 x 10 mm en una disposición para el disco de 10 imanes por disco y para este generador se utilizaron dos discos con

imanes dando un total de 20 imanes N35, para ejemplificar como es la disposición de los imanes en un generador de flujo axial se tiene la siguiente figura:

Figura 44.

Distribución de imanes permanentes del generador de flujo axial.



Nota. Adaptado de (Luisa Herrera, 2013)

De la figura 44 se observa cómo es la orientación de los polos para un generador de flujo axial

Para el cálculo de la fuerza electromotriz inducida la cual dará origen a la corriente eléctrica se rige por la ecuación:

$$\varepsilon = fc * 0.074 * rpm * (B * r1 + r2) * N * L \quad (9.1)$$

$$fc = \frac{\text{Simanes}}{\text{Scornona circula}} \quad (9.2)$$

Donde:

ε = Fuerza electro motriz inducida (v)

fc = Factor geométrico

B = Intensidad del campo magnético (T)

$r1$ = Radio menor del segmento (m)

$r_2 =$ Radio externo del segmento (m)

$L =$ Longitud del segmento (m)

$N =$ Número de bobinas

$S_{\text{imanes}} =$ Superficie de todos los imanes

$S_{\text{corona circular}} =$ Superficie total de la corona circular donde están colocados los imanes

Para la ecuación 9.2 se toma una relación de áreas de $f_c = 0.5$ y de la ecuación 9.1 tenemos lo siguiente:

$$B = 1.195 \text{ (T)}$$

$$r_1 = 0.05455 \text{ m}$$

$$r_2 = 0.11455 \text{ m}$$

$$L = 0.06 \text{ m}$$

$$N = 10$$

Para el alternador se optó por que fuera de 12 v y los rpm a los cuales estará rotando el generador son de:

$$rpm = 359$$

Remplazando los valores en la ecuación 13.1 se tiene que:

$$12 \text{ V} = 0.074 * 359 \text{ rpm} * (1.195 \text{ T} * 0.05455 \text{ m} + 0.11455 \text{ m}) * 0.06 \text{ m} * N$$

$$N = 418.8$$

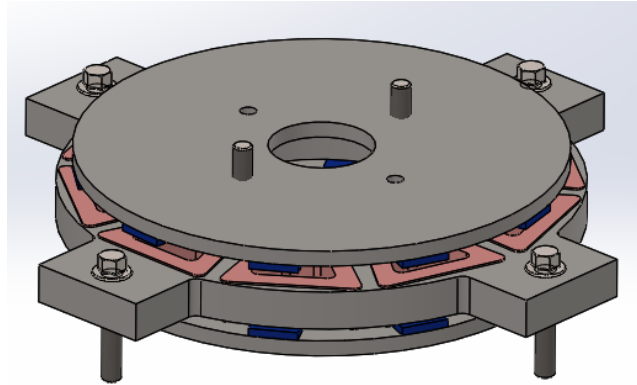
De este cálculo se tiene que para el número de vueltas

$$Nb = \frac{418.8}{10} = 41.8 \cong 42 \text{ vueltas}$$

La disposición del rotor junto con el estator quedaría como se puede apreciar en la figura 45:

Figura 45.

Disposición del generador con el estator.



Nota. Adaptado de (autores)

9.1 Selección de componentes eléctricos

La energía producida por el generador eólico debe ser intervenida antes de ser utilizada en un hogar debido a que esta no es estable, para ello se pueden implementar dos formas de disponer de la energía generada, una es de forma directa haciendo uso un invertidor con controlador, la conexión de este tipo se presenta en la figura 46.

Figura 46.

Circuito eléctrico directo.



Nota. Adaptado de (Aliexpress)

Figura 47.

Inverter con controlador MPPT.



Nota. Adaptado de (Aliexpress)

Figura 48.*Ficha técnica.*

Datos de entrada	
Rango de voltaje de entrada	22-65v/45-90VAC (turbina eólica de 24V o 48V CA)
Voltaje máximo de entrada CC	60V/90V
Voltaje de seguimiento de potencia máxima	25-60V/50-90V
Datos de salida	
Potencia máxima de salida	1000W
Voltaje Nominal	Detección automática 110vac/230vac
Rango de voltaje Nominal	95-140v/185-265v
Rango de frecuencia	47,5-51,5 para 50hz; 59,3-60,5 para 60hz
Factor de potencia	> 0,95
Forma de onda de salida	Onda sinusoidal pura
Datos característicos	
Eficiencia MPPT	99%
Protección contra sobrecorriente	Sí
Protección contra sobrecalentamiento	Sí
Protección de polaridad inversa	Sí
Protección antiisla	Sí
Apilable	Solo para salida de CA
Rango de temperatura de funcionamiento	-20 °C --- + 50 °C
Temperatura interior del inversor	-20 °C --- + 85 °C
Corriente THD	<5%
Voltaje THD	<5%
Estándar	UL1741,IEEE1547,VDE4105
Enfriamiento	Ventiladores
Eficiencia máxima del inversor	> 92%
Garantía	2 años

Nota. Adaptado de (Aliexpress)

La segunda forma de realizar la configuración eléctrica es por medio de un sistema híbrido haciendo uso de colectores solares, este proceso se puede por medio de un controlador MPPT (ver figura 47). A continuación, se muestra la conformación del circuito para este tipo.

Figura 49.

Circuito eléctrico híbrido.



Nota. Adaptado de (Aliexpress)

Los componentes que se utilizan para este tipo de configuración son:

Figura 50.

Controlador MPPT híbrido.



Nota. Adaptado de (Aliexpress)

Figura 51.

Ficha técnica controladora MPPT híbrido

Battery Parameters				
Rated Voltage	24V			
Protection	reverse polarity protection(fuse burn-out), over voltage protection, low voltage protection(for street lights)			
Over voltage protection point	29.0V±0.2V			
Over voltage protection recover point	27.5V±0.2V			
Low voltage protection point	21.0V±0.2V			
Low voltage protection recover point	23.0V±0.2V			
Wind input parameters				
Rated wind power	400W	600W	800W	1000W
Start charging voltage	12V(24V system)			
Rated input current	20A DC(after rectification)			
Maximum input current	25A DC(after rectification)			
Default rotation speed limit	500 Rpm (adjustable)			
Default input current limit	20A (adjustable)			
Protection	Over speed protection, over current protection, induced lightning strike protection			
Unloading method	PWM highfrequency smooth unloading (build-in) & Manual brake			
MPPT mode	Boost MPPT(MPPT or 5-segment curve input tracking)			
MPPT channel input current	5A default			
PV input parameters				
Rated Power	Standard 600W/24V (Optional 1000W/24V)			
Rated input current	Standard 15A, (Optional 30A)			
Voltage drop when charging	<0.2V			
PV protection	Reverse connection protection			
Unloading method	Open circuit			
Load output parameters				
Output way	2 ways			
Output current/way	12A			
Output mode	Light control, time control, morning light, permanent output.			
Other parameters				
Display	three-digit numeric LEDdisplay			
Communication	Standard TTL232(5V voltage level) (Optional RS485/short distance wireless RF)			
Contents	Wind: input voltage/current/power/cumulative power/RPM/unloading current Solar: input voltage/current/power/cumulative power Battery:Voltage/charging current/power/cumulative power charge/battery status info			
standby power consumption(screen backlight)	About 17ma /24V			
Operation	2 buttons			
Working temperature & humidity	-40~+80℃/20~85%RH (no condensation)			
Protection grade	IP41			
Dimension	158mm*117mm *60mm			
Net weight	0.8KG			

Nota. Adaptado de (Aliexpress)

Figura 52.*Invertidor.*

Nota. Adaptado de (Aliexpress)

Figura 53. Ficha técnica inverter.

Starting peak value: 1600W rated power: 800W

Output waveform: pure sine wave, output voltage: 220 V

Input voltage: 12v24v48v60v optional high efficiency conversion: Yes

Material: aluminum magnesium alloy radiator shell product weight: 0.85kg

Product size: 21cm * 11cm * 5.5cm

Odd display: battery input voltage display

Scope of application: lighting, computer TV, electric fan, audio digita

l products (for reference only) small electric walkie talkie, fish tank pump, printer, LED lighting, etc

Wiring: About 50cm long

Nota. Adaptado de (Aliexpress)

Para el almacenamiento de la energía se hace necesario la implementación de una batería la cual se presenta en la figura 54.

Figura 54.

Batería.



Nota. Adaptado de (Aliexpress)

10. Prototipo de aerogenerador

En este apartado se encontrará lo relacionado a la de construcción del prototipo de generador eólico. A continuación, en la tabla 11 se presentan algunas de las características del prototipo de aerogenerador.

Tabla 11.*Propiedades de masa prototipo aerogenerador.*

Propiedades de masa de Ensamblaje Final

Masa = 0.30 kilogramos
Volumen = 300.29 centímetros cúbicos
Área de superficie = 1583.92 centímetros cuadrados
Centro de masa: (centímetros)
X = 8.66
Y = -4.35
Z = 6.52
Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (kilogramos * centímetros cuadrados)
Medido desde el centro de masa.
$I_x = (-0.18, 0.98, 0.00)$ $P_x = 17.92$
$I_y = (-0.98, -0.18, 0.00)$ $P_y = 37.10$
$I_z = (0.00, 0.00, 1.00)$ $P_z = 45.82$
Momentos de inercia: (kilogramos * centímetros cuadrados)

Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados		
$L_{xx} =$	$L_{xy} = -$	$L_{xz} =$
36.46	3.45	0.00
$L_{yx} = -$	$L_{yy} = 18.57$	$L_{yz} =$
3.45		0.00
$L_{zx} =$	$L_{zy} =$	$L_{zz} =$
0.00	0.00	45.82
Momentos de inercia: (kilogramos * centímetros cuadrados)		
Medido desde el sistema de coordenadas de salida.		
$I_{xx} =$	$I_{xy} = -14.76$	$I_{xz} =$
54.92		16.95
$I_{yx} = -$	$I_{yy} =$	$I_{yz} = -$
14.76	53.84	8.52
$I_{zx} =$	$I_{zy} = -$	$I_{zz} =$
16.95	8.52	73.99

Nota. Adaptado de (Autores).

Registro de datos determinados por el programa SolidWorks

10.1 Selección del material

Una parte importante a la hora de diseñar los perfiles son los materiales con los cuales se harán estos, ya que se busca que puedan aprovechar la mayor cantidad de aire, se busca que sean ligeros, que tengan una muy buena resistencia debido a que estas características influirán en la eficiencia que el aerogenerador tendrá.

Para la parte del prototipo a escala se tomó como referente el uso del polímero PLA ya que se buscó la implementación de materiales no convencionales para observar el comportamiento que estos tendrán a la hora de realizar las pruebas además de ellos en la tabla 12 se muestran las propiedades físicas de dicho material las cuales son:

Tabla 12.

Propiedades mecánicas del PLA

PROPIEDADES MECÁNICAS	PLA
Resistencia a la tracción (MPa)	59
Alargamiento a la ruptura (%)	7
Modulo elástico (MPa)	3500
Modulo corte (MPa)	1287
Radio Poisson	0,36
Rendimiento	70
Resistencia a la flexión (MPa)	106
Dureza (HR)	88
Temperatura de reflexión térmica (°C)	55
Porciento de elongación (%)	11,3
Módulo de Young (Mpa)	1280

Nota. Adaptado de (Ing. Víctor Cepeda,2018)

10.2 Simulación del prototipo de aerogenerador

Por medio del software SolidWorks se llevó a cabo el proceso de simulación de la estructura sometida a las cargas previamente calculadas, para ello se realizó el análisis para las dos estructuras teniendo presente que el prototipo a construir será con el polímero PLA, definido esto tenemos que para llevar a cabo una proporcionalidad con las cargas a las cuales este estará sometido se aplicó un factor de escala 6.67:1, mencionado factor de escala fue aplicado para que las pruebas se pudieran llevar a cabo dentro del túnel de viento y el prototipo del aerogenerador pudiera entrar dentro de él. Durante la faceta de cálculos dando como resultado una fuerza resultante $F_r = 23.28 N$, con lo cual se obtuvo lo siguiente:

Añadido el material a la estructura el mismo software nos permite determinar la masa, volumen, área de superficie dando valores de:

$$Masa = 0.30 Kg$$

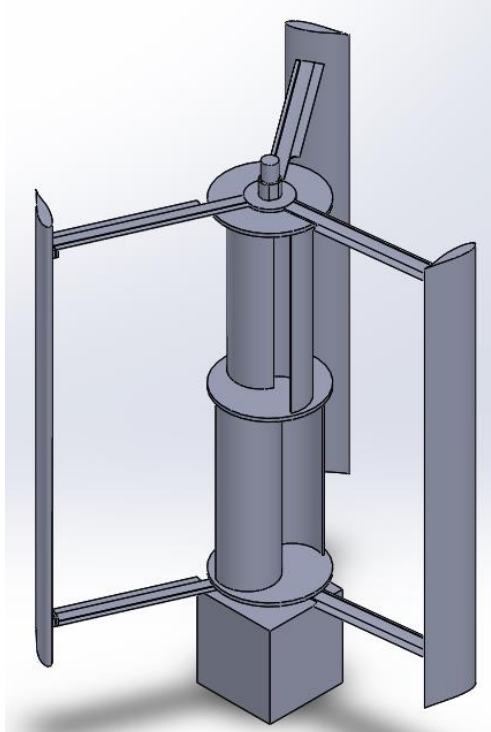
$$Volumen = 300 cm^3$$

$$Área de superficie = 1583.92 cm^2$$

En la figura 55 y 56 se observa la correspondiente vista isométrica y lateral derecha del prototipo de aerogenerador.

Figura 55.

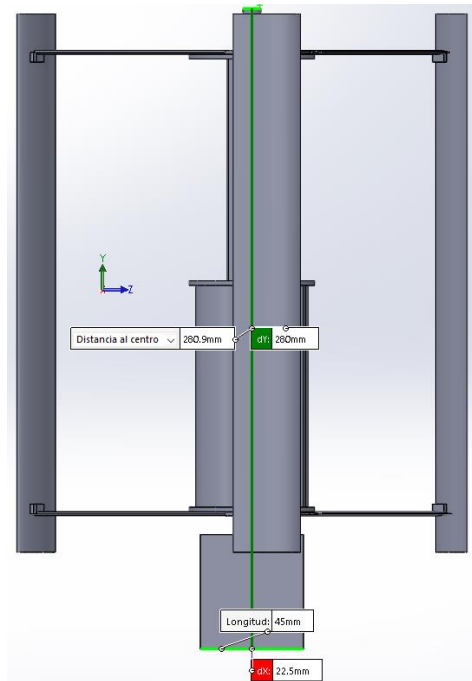
Vista isométrica estructura



Nota. Adaptado de (Autores)

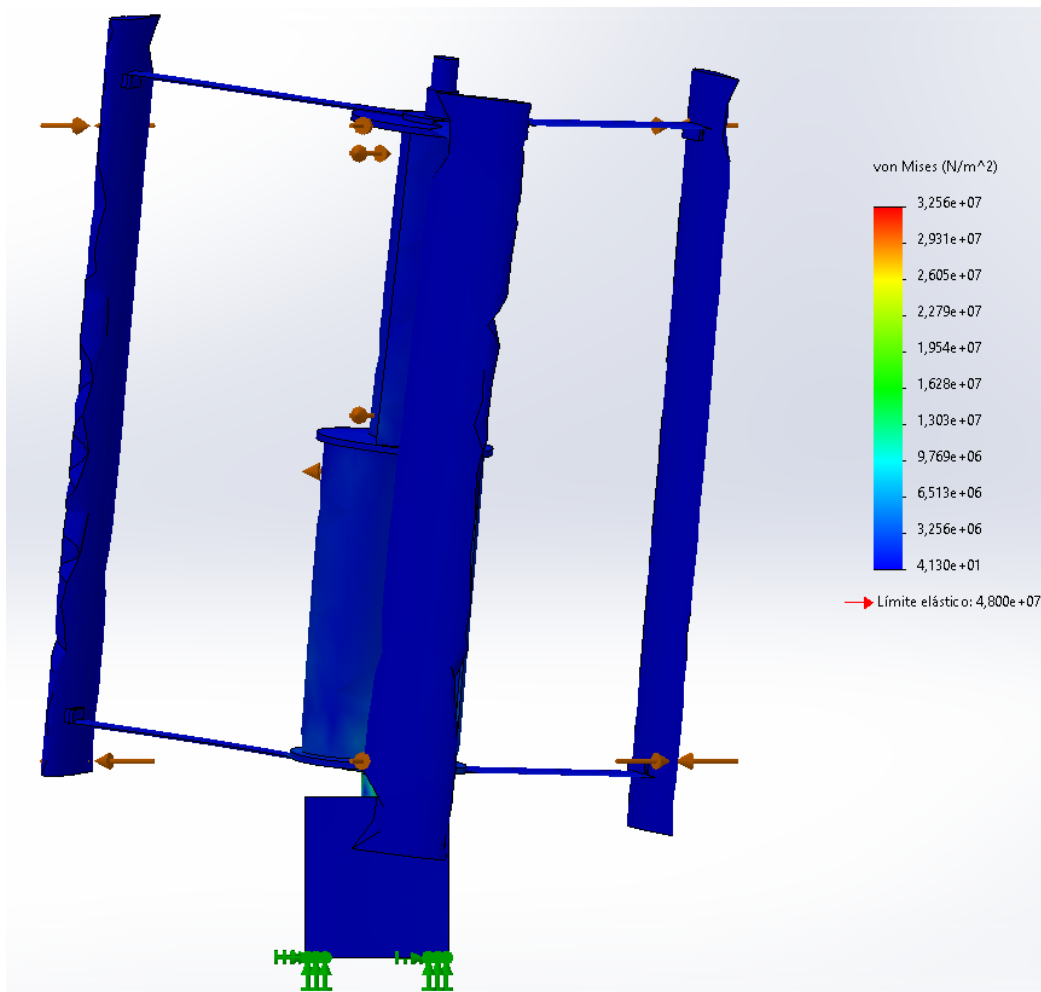
Figura 56.

Vista lateral derecha



Nota. Adaptado de (Autores)

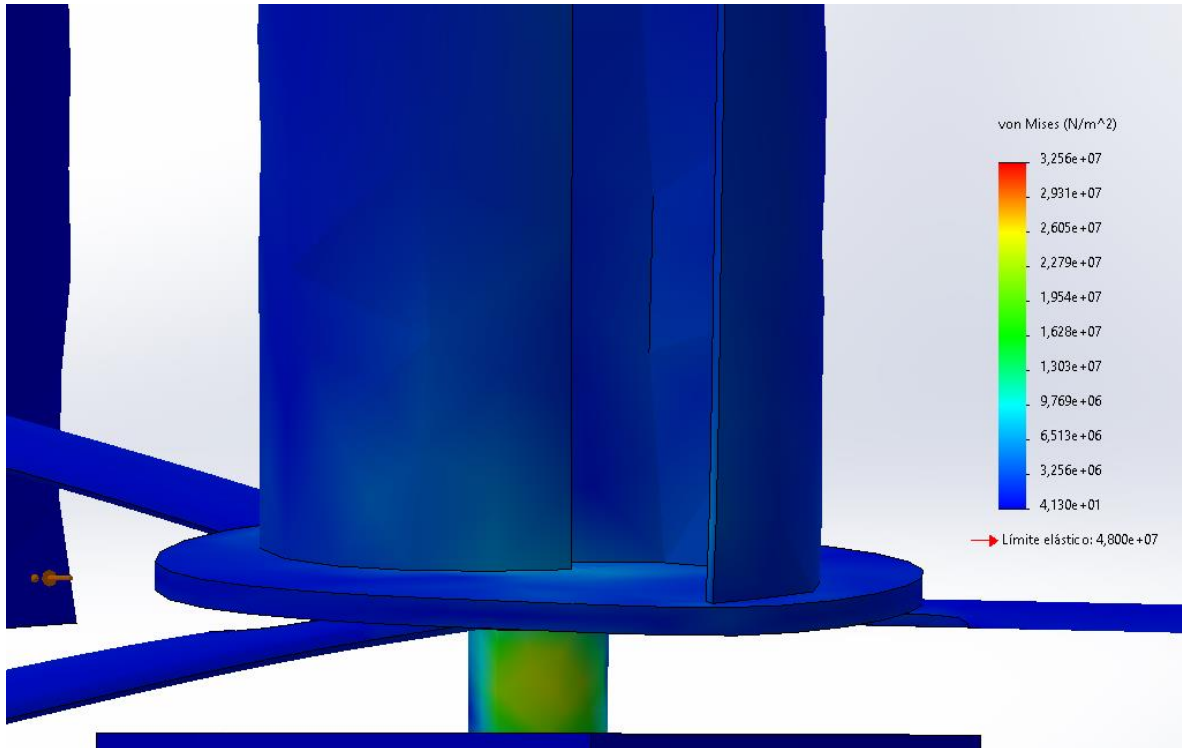
De la figura 56 podemos observar que la dimensión del prototipo del generador es de 280 mm

Figura 57.*Tensiones de Von Mises*

Nota. Adaptado de (Autores)

Figura 58.

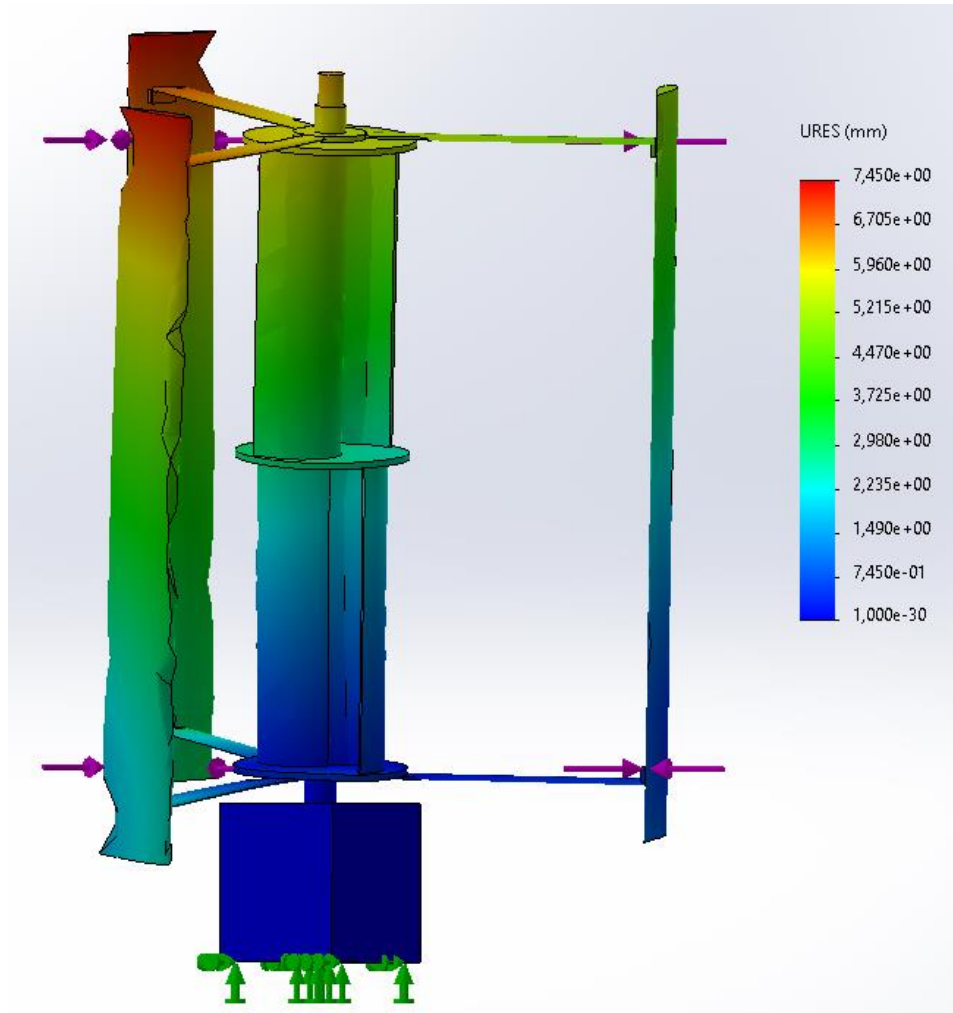
Vista ampliada de la estructura



Nota. Adaptado de (Autores)

De la figura 57 y 58 respectivamente se observa como es el comportamiento de la estructura al ser sometido a las cargas distribuidas. Se observa también que la parte donde más esfuerzo se presenta es en la parte inferior donde se ubica el eje, pero si se observa en la escala de color ubicado al lado derecho se observa que el límite elástico del PLA es $4.8 * 10^7 \frac{N}{mm^2}$, en base a esto vemos que el material resiste sin complicaciones la aplicación de la carga distribuida, cabe aclarar que el gráfico de colores nos indica los valores más elevados de esfuerzo, siendo el color rojo el que indica el mayor esfuerzo al que se estaría sometiendo la estructura y el color azul oscuro donde poco o nada de esfuerzo es sometida la estructura.

Figura 59.

Desplazamiento del generador

Nota. Adaptado de (Autores)

De la figura 59, se observan los puntos donde ocurriría un mayor desplazamiento de la estructura siendo la parte superior la que mayor valor tiene siendo de 7.45 mm, como se observa en la figura 57, la estructura parece que fuera a ladearse, pero cabe aclarar que el software exagera el desplazamiento para que sea más apreciable el comportamiento que éste va a tener dicho esto el valor antes mencionado es bastante pequeño en comparación al tamaño.

10.3 Proceso de manufactura del prototipo

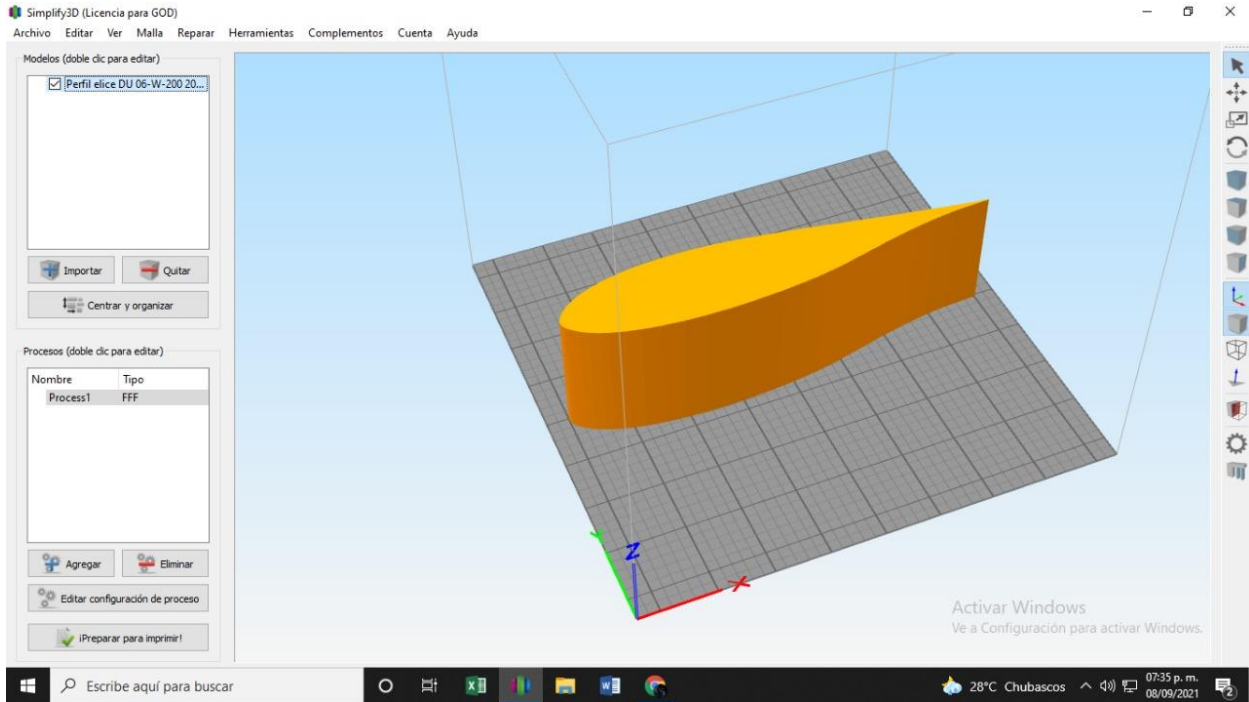
Realizadas las pruebas a la estructura mediante el software CAD/CAE, se continuó con el proceso de manufactura del prototipo, para ello se utilizó una impresora 3D con la cual se realizó la impresión de las piezas. Los diseños impresos fueron dos; uno era el perfil DU06-W-200 de 20 cm de largo y 6 cm de ancho, y el otro diseño era el prototipo a escala del aerogenerador, el cual se imprimió pieza por pieza y al final se ensambló.

El proceso de impresión tardó aproximadamente 3 días en llevarse a cabo dando los siguientes resultados:

En la figura 60 se observa el software Simplyfy3D el cual fue el encargado de previsualizar el modelo de la pieza antes de que esta fuera impresa.

Figura 60.

Modelo perfil DU06-W-200 para imprimir

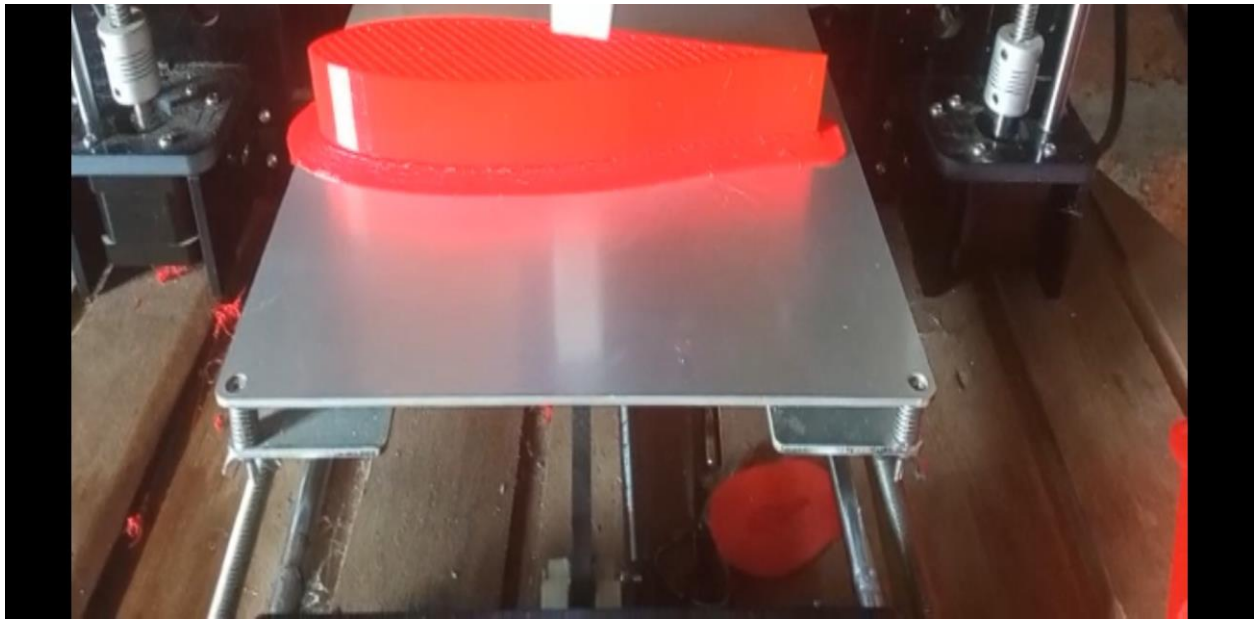


Nota. Adaptado de (Autores)

En la figura 61, se observa como poco a poco se fue imprimiendo el perfil aerodinámico DU06-W-200

Figura 61.

Proceso de impresión del perfil DU06-W-200



Nota. Adaptado de (Autores)

En la figura 62, se observan todas las piezas que fueron fabricadas por la impresora 3D, entre ellas se destaca el perfil aerodinámico DU06-W-200 y el prototipo del aerogenerador.

Figura 62.

Resultado impresión prototipo del aerogenerador y perfil DU06-W-200



Nota. Adaptado de (Autores)

De la construcción del prototipo se puede observar que después de impreso éste tuvo un postproceso en donde se lijaron las piezas para eliminar impurezas y se procedió con el pegado de cada una de las piezas para conformar el prototipo como tal.

Se construyó el perfil DU06-W-200 con la finalidad de calcular la aerodinámica de los álabes, se buscaba comparar los valores del coeficiente de arrastre (C_d) y sustentación (C_l) tomados de (García Rodríguez, 2020).

En la figura 63, se observa como quedó el ensamblaje del prototipo de aerogenerador con su respectivo soporte para llevar a cabo las pruebas.

Figura 63.

Prototipo aerogenerador ensamblado



Nota. Adaptado de (Autores)

11. Pruebas del prototipo

El objetivo de realizar las pruebas en el túnel de viento es asemejar en gran medida las condiciones de viento a las cuales está el cañón del Chicamocha. El experimento consistió en variar la velocidad del viento e ir midiendo las RPM a las que giraba el prototipo, para esta prueba se realizaron 13 mediciones, posteriormente se procedió a dejar registro de los datos que pueden ser observados en la tabla 13.

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas realizadas con el túnel de viento de la Universidad Industrial de Santander tal como se ve en la figura 64. donde se ubicó el prototipo dentro del túnel de viento y se procedió a encender el ventilador. Ver ficha técnica del prototipo en el anexo 4. Por medio del tubo de Pitot se midió la presión total y estática denominadas respectivamente como Sp-11 y Sp-12 variando la velocidad del viento en el túnel desde 5,06 [m/s] hasta 11,59 [m/s], posteriormente se procedió a calcular la velocidad del viento con la ecuación de Bernoulli,

$$V = \sqrt{\frac{2g\Delta h\rho_{H_2O}}{\rho_{Aire}}} \quad (11.1)$$

Donde:

$$\Delta h = \frac{SP11-SP12}{1000} \text{ [mwc]} \quad (11.2)$$

A continuación, se calculó el valor del número de Reynolds con la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{V_{\infty} \cdot x}{\nu} \quad (11.3)$$

Siendo:

Re: N° de Reynolds.

ρ_{H_2O} : Densidad del agua; 998 kg/m³.

ρ_{Aire} : Densidad del aire; 1,225 kg/m³.

V: Velocidad de corriente libre del aire en m/s.

x: Longitud de la cuerda del álabe; 0,02947 m.

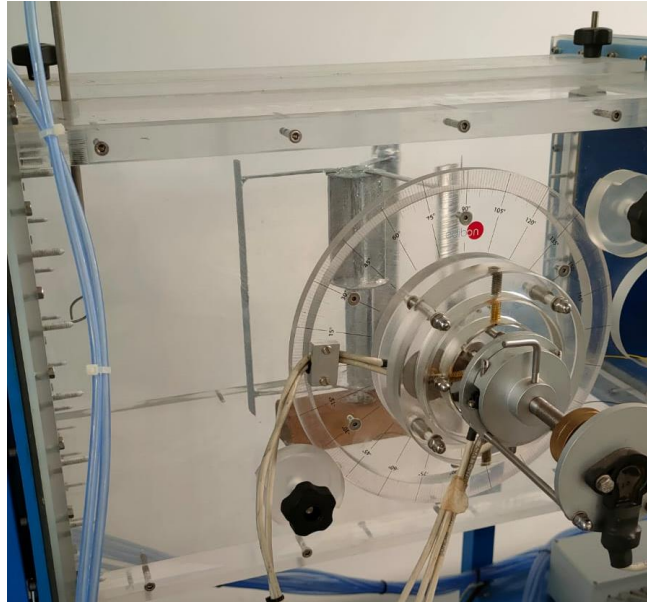
ν : Viscosidad cinemática del aire; $1,47 \cdot 10^{-5}$ m²/s.

g: Fuerza de gravedad; 9,8 m/s².

En la figura 64, se observa cómo fue ubicado el prototipo dentro de la zona de trabajo del túnel de viento.

Figura 64.

Prototipo del aerogenerador funcionando en el túnel de viento



Nota. Adaptado de (Autores)

Los resultados del desarrollo del experimento se muestran en la tabla 13 donde podemos encontrar la velocidad angular a la que gira el aerogenerador medida con un estroboscopio (aplicación de celular) y una marca en el álabe del rotor. El funcionamiento de esta aplicación consiste en cambiar la frecuencia de la luz emitida por el estroboscopio hasta que la marca se vea cuasi estática.

La potencia útil se halló por medio de la ley de Betz donde se mantuvieron constantes los valores de las dimensiones del prototipo, ver figura 65.

Figura 65.

Uso de la ley de Betz para hallar la potencia generada por el prototipo

The image shows a software interface with two main windows: "Equations Window" and "Solution".

Equations Window:

- "Eficiencias"
 - $n_m = 0,95$ "eficiencia mecanica"
 - $n_e = 0,85$ "eficiencia electrica"
 - $C_p = 0,35$ "coeficiente de potencia"
- "Eficiencia total"
 - $n_t = n_m * n_e * C_p$
- "Velocidad angular"
 - $\omega_{RPM} = 14,8$
- "Potencia nominal"
 - $P_n = P_{util} / n_t$
- "Ley de Betz"
 - $P_n = 0,5 * \rho_a * A * V^3$
- "Densidad del aire"
 - $\rho_a = 1,25$ [Kg/m³]
- "Dimensiones del rotor"
 - $D = 0,2105$
 - $h = 0,2357$
 - $A = D * h$
 - $R = D / 2$
- "PARAMETROS DE DISEÑO"
 - $TSR = 4$
- "Consideraciones aerodinámicas"
 - $TSR = (\omega_{rad} * R) / V$
 - $\omega_{RPM} = \omega_{rad} * 60 / (2 * \pi)$

Solution Window:

- Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg
- $A = 0,04961$
- $D = 0,2105$
- $n_e = 0,85$
- $n_t = 0,2826$
- $\omega_{RPM} = 14,8$
- $P_{util} = 5,944E-07$
- $\rho_a = 1,25$ [kg/m³]
- $V = 0,04078$
- $C_p = 0,35$
- $h = 0,2357$
- $n_m = 0,95$
- $\omega_{rad} = 1,55$
- $P_n = 0,000002103$ [kg/m³]
- $R = 0,1053$
- $TSR = 4$

1 potential unit problem was detected. [Check Units](#)

Calculation time = ,0 sec.

Nota. Adaptado de (Autores)

En la tabla 13 se observan los diferentes datos registrados durante el desarrollo de las pruebas de laboratorio haciendo uso del túnel de viento, tomando en cuenta que las variables Sp-11 y Sp-12 fueron descritas al inicio del capítulo.

Tabla 13.*Resultados de la prueba de funcionamiento del prototipo*

SP- 11(mmwc)	SP- 12(mmwc)	delta h [m]	Velocidad [m/s]	Reynolds	ω [RPM]
6,8	5,2	0,0016	5,06	68804,90	14,8
6,8	4,8	0,002	5,65	76926,22	28
7,3	5,2	0,0021	5,79	78825,92	46,9
8,2	5,4	0,0028	6,69	91020,33	67,2
9	5,8	0,0032	7,15	97304,83	87
9,7	6	0,0037	7,69	104630,97	112
10,2	6	0,0042	8,19	111476,68	134,4
11,3	6,3	0,005	8,94	121631,03	162,7
12,5	7	0,0055	9,38	127567,70	183
13,2	7,1	0,0061	9,87	134345,87	188
13,8	7,2	0,0066	10,27	139743,42	190
15	7,4	0,0076	11,02	149956,81	191
16,4	8	0,0084	11,59	157651,84	192,7

Nota. Adaptado de (Autores)

11.1 Pruebas del perfil del álabe DU06-W-200

La empresa Edibon nos menciona que:

Para llevar a cabo experimentos relativos al comportamiento de los cuerpos en movimiento con relación al aire, es necesario tener una corriente de aire en movimiento con respecto al cuerpo, cuyas características podremos controlar. La instalación que permite obtener esta corriente es el túnel aerodinámico.

En la mayoría de los casos, resulta de interés estudiar el comportamiento de un cuerpo bajo un flujo uniforme, es decir con la misma velocidad en todos sus puntos. Por esa razón muchos túneles proporcionan un flujo uniforme en la sección de trabajo.

Figura 66.

Partes del túnel de viento



Nota. Adaptado de (Edibon,2018)

Un túnel de viento es aquella estructura la cual permite obtener un flujo de fluido uniforme a velocidades controladas, permitiendo el estudio del efecto del viento sobre objetos reales o maquetas a escala y el funcionamiento de este se realiza al encender el ventilador y este empezara a aspirar el aire que se encuentra a lo largo de la estructura, el aire ingresa a lo largo de la tolva (ver figura 66), al momento de pasar por esta sección los sensores captan la variación de la presión de aire que pasa en ese instante hasta llegar a la zona de trabajo que es donde se ubica el prototipo a estudiar, al momento de chocar la corriente de aire con el prototipo de estudio se genera un cambio en la presión interna en el túnel que es registrada por los sensores, dicho cambio de presión.

En este apartado se buscaba medir distintas variables aerodinámicas tales como el coeficiente de arrastre (C_d) y el coeficiente de sustentación (C_l) por medio del túnel de viento de

la universidad industrial de Santander, este experimento consistía en ubicar el perfil de álabe DU06-W-200 dentro del túnel de viento y mediante la implementación de varios sensores los cuales iban desde Sp-1 a Sp-10 ubicados a lo largo del túnel, dichos sensores son los encargados de ir registrando la variación en el cambio de la presión además de que se incluyen el tubo de Pitot (encargado de medir la presión estática y total) ver figura 67.

Figura 67.

Tubo de Pitot



Nota. Adaptado de (Autores)

Se planeaba medir la aerodinámica del perfil para corroborar los datos registrados por parte de los investigadores Nawfal M Ali, Dr.Sattar Aljabair, & Dr.Abdul Hassan A.K. en su artículo.

Para el desarrollo del experimento se tuvo en cuenta la guía de laboratorio proporcionada por la empresa Edibon para conocer las variables a medir con sus correspondientes sensores,

posteriormente con la ayuda del software (ver figura 68 y 69) de la empresa se procedió a variar el porcentaje de potencia del ventilador para poder obtener las variables aerodinámicas medidas por los sensores. El procedimiento llevado a cabo para el perfil aerodinámico se presenta a continuación:

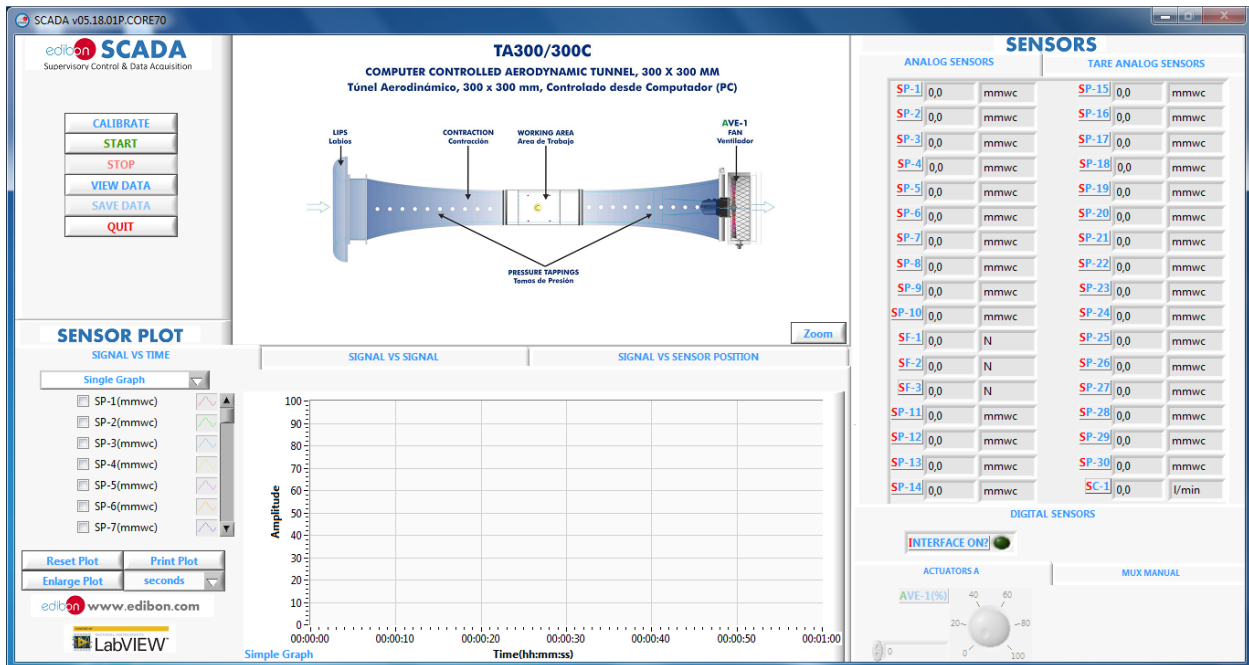
En el banco de pruebas se realizó el siguiente proceso de registro de datos:

- Se varió el ángulo de ataque en 3 posiciones diferentes (0° , 10° , 17°), debido a problemas de calibración del túnel de viento estos ángulos están desfasados entre 2 y 4 grados.
- La potencia del ventilador en porcentaje se varió para obtener 3 velocidades aproximadas de viento, estas fueron de ($20\% = 4.7 \text{ m/s}$, $25\% = 5.4 \text{ m/s}$ y $30\% = 5.9 \text{ m/s}$).
- La tabla con los datos registrados por el software se pueden observar en el apartado de anexo 3.
- Al variar el porcentaje de potencia del ventilador para las pruebas se debía esperar un cierto tiempo para que los sensores se estabilizaran para las nuevas condiciones de estudio.

Con cada ángulo de ataque se registraron 3 velocidades con sus respectivos valores de coeficiente de sustentación (C_l), arrastre (C_d), presión estática (SP-11) y presión total (SP-12).

Figura 68.

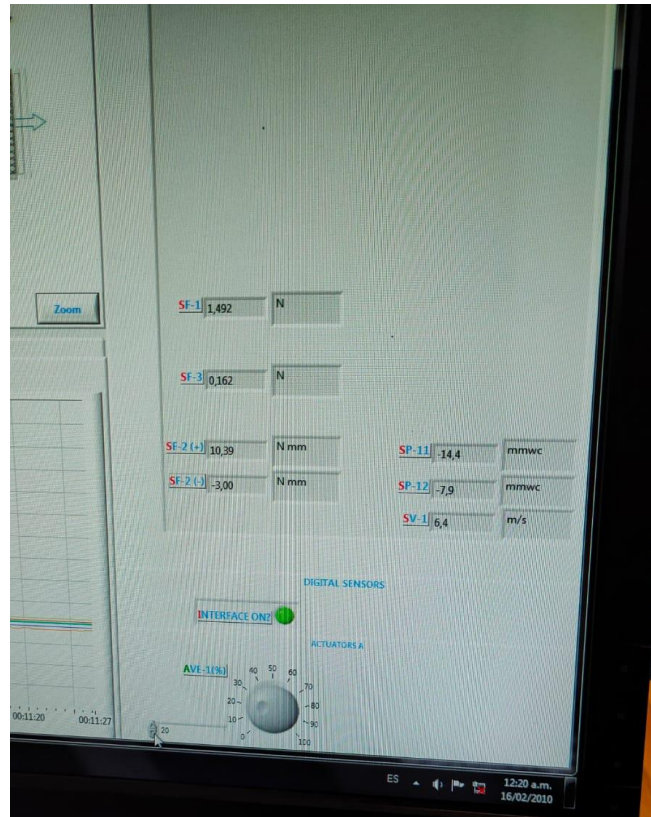
Software Edibon SCADA



Nota. Adaptado de (Edibon, 2018)

Figura 69.

Registro de datos del software



Nota. Adaptado de (Autores)

Los datos registrados durante las pruebas realizadas ser presentan en la tabla 14, tabla 15 y tabla 16 respectivamente.

Tabla 14.*Coefficiente de sustentación y de arrastre para una $V \approx 4,7$ m/s*

SANG-1(°)	SF-1(N)	SF-3(N)	Cl	Cd
2	-0,047	0,056	0,01408611	0,01141306
2	-0,047	0,056	0,01408611	0,01141306
2	-0,047	0,057	0,01422837	0,01154504
2	-0,055	0,032	0,01171365	0,00893002
2	-0,046	0,033	0,01068403	0,00829185
2	-0,049	0,04	0,01207044	0,00947246
2	-0,046	0,032	0,01054177	0,00815986
2	-0,054	0,048	0,01385953	0,0109562
2	-0,045	0,042	0,01183412	0,00939413
2	-0,044	0,054	0,01341098	0,01089237
14	0,085	0,038	0,00952572	-0,00225834
14	0,086	0,035	0,00910357	-0,00273986
14	0,086	0,035	0,00910357	-0,00273986
14	0,086	0,035	0,00910357	-0,00273986
14	0,086	0,035	0,00910357	-0,00273986
14	0,086	0,035	0,00910357	-0,00273986
14	0,086	0,035	0,00910357	-0,00273986
14	0,086	0,035	0,00910357	-0,00273986
14	0,086	0,035	0,00910357	-0,00273986
14	0,086	0,036	0,00925855	-0,00260788
14	0,086	0,036	0,00925855	-0,00260788
20	0,066	0,061	0,01713962	0,00240319
20	0,062	0,029	0,01205844	-0,00147801
20	0,061	0,048	0,01464446	0,00111526
20	0,063	0,022	0,01118634	-0,00248747
20	0,064	0,017	0,0105999	-0,00323296
20	0,065	0,013	0,01015628	-0,00384647
20	0,06	0,065	0,01694482	0,00344457
20	0,06	0,065	0,01694482	0,00344457
20	0,064	0,053	0,01574164	0,00151846
20	0,065	0,048	0,0151552	0,00077297

Nota. Adaptado de (Autores).

Donde:

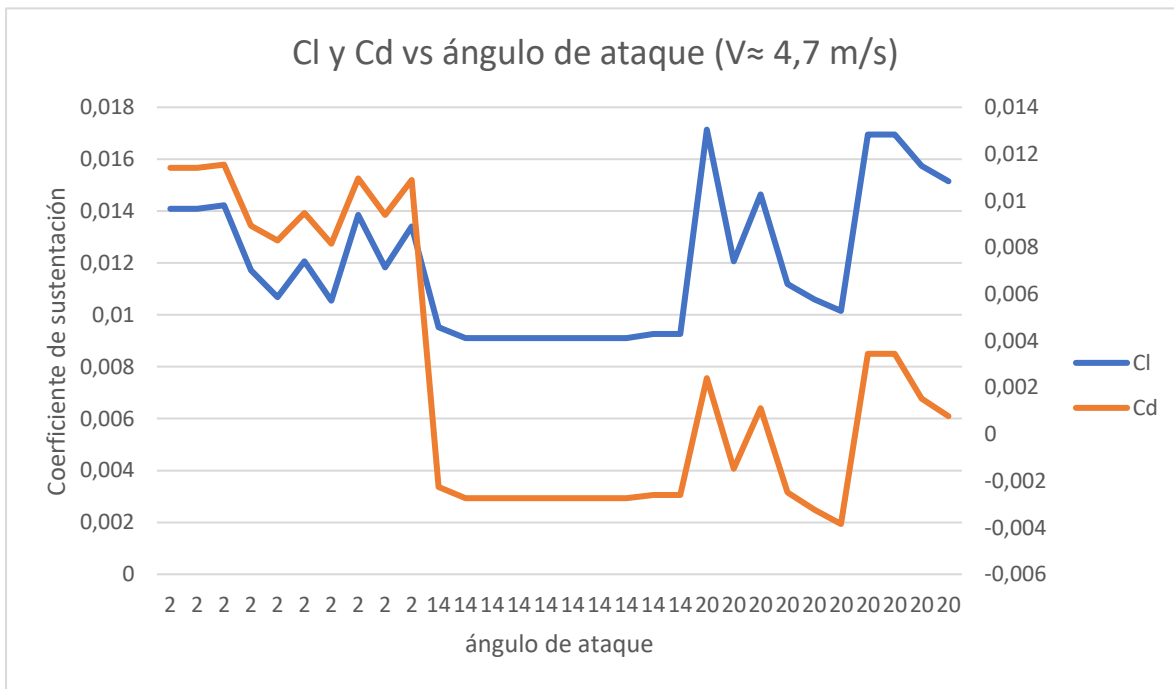
SF-1: mide la componente de la fuerza resultante ejercido por el fluido perpendicular a la dirección del flujo del fluido sentido positivo.

SF-3: mide la componente de la fuerza resultante ejercido por el fluido paralela a la dirección del flujo del fluido.

SANG-1(°): ángulo de ataque aproximado al cual fue sometido el perfil.

Figura 70.

Cl y Cd vs ángulo de ataque a $V \approx 4,7$ m/s



Nota. Adaptado de (Autores)

Tabla 15

. Coeficiente de sustentación y de arrastre para una $V \approx 5,4$ m/s

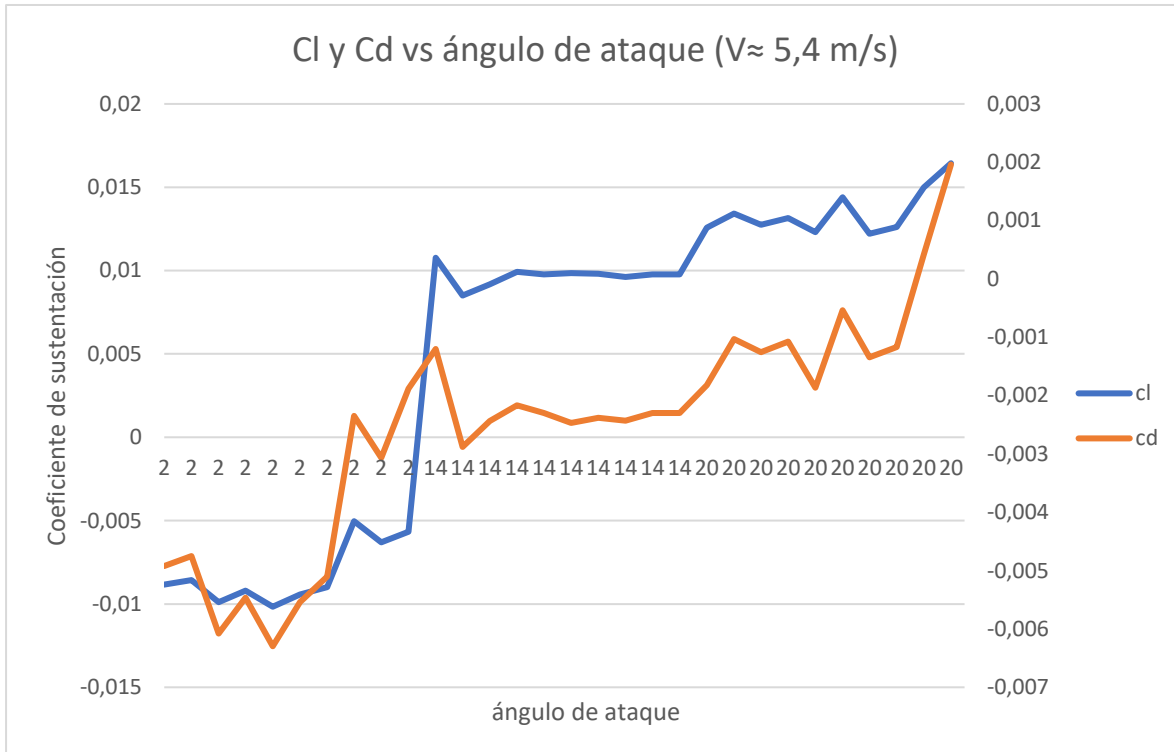
SANG-1(°)	SF-1(N)	SF-3(N)	Cl	Cd
2	0,093	0,023	-0,00883752	-0,00492268
2	0,091	0,023	-0,00857711	-0,00475154
2	0,088	0,011	-0,00989355	-0,00607863
2	0,087	0,015	-0,00919432	-0,00546512
2	0,089	0,01	-0,01016601	-0,00629618

2	0,091	0,017	-0,00943064	-0,00554344
2	0,092	0,021	-0,00899183	-0,00510108
2	0,066	0,025	-0,00503738	-0,00234824
2	0,079	0,028	-0,00630333	-0,00306474
2	0,096	0,048	-0,00567176	-0,0018798
14	0,085	0,046	0,01076553	-0,00120246
14	0,083	0,032	0,00851029	-0,00287909
14	0,084	0,036	0,00917298	-0,00243673
14	0,087	0,04	0,00992124	-0,00216551
14	0,087	0,039	0,00976626	-0,0022975
14	0,089	0,039	0,00985183	-0,00246865
14	0,088	0,039	0,00980905	-0,00238307
14	0,087	0,038	0,00961129	-0,00242948
14	0,087	0,039	0,00976626	-0,0022975
14	0,087	0,039	0,00976626	-0,0022975
20	0,066	0,029	0,01256918	-0,0018203
20	0,066	0,035	0,01342614	-0,0010284
20	0,064	0,032	0,01274229	-0,0012532
20	0,065	0,034	0,01315563	-0,00107481
20	0,065	0,028	0,01229867	-0,00186671
20	0,068	0,04	0,01439564	-0,00053962
20	0,062	0,03	0,01220127	-0,00134602
20	0,063	0,032	0,01261461	-0,00116763
20	0,066	0,046	0,01499723	0,00042343
20	0,065	0,057	0,01644063	0,00196083

Nota. Adaptado de (Autores)

Figura 71.

Cl y Cd vs ángulo de ataque a $V \approx 5,4$ m/s



Nota. Adaptado de (Autores)

Tabla 16.

Coeficiente de sustentación y de arrastre para una $V \approx 6$ m/s

SANG-1(°)	SF-1(N)	SF-3(N)	Cl	Cd
2	0,089	0,04	-0,00589835	-0,00233666
2	0,089	0,04	-0,00589835	-0,00233666
2	0,089	0,04	-0,00589835	-0,00233666
2	0,089	0,04	-0,00589835	-0,00233666
2	0,089	0,04	-0,00589835	-0,00233666
2	0,089	0,04	-0,00589835	-0,00233666
2	0,089	0,04	-0,00589835	-0,00233666
2	0,089	0,04	-0,00589835	-0,00233666
2	0,089	0,041	-0,00575609	-0,00220468

14	0,065	- 0,043	-0,00388302	-0,01123758
14	0,067	- 0,045	-0,00410741	-0,0116727
14	0,066	- 0,045	-0,00415019	-0,01158712
14	0,065	- 0,043	-0,00388302	-0,01123758
14	0,065	- 0,047	-0,00450293	-0,01176552
14	0,066	- 0,045	-0,00415019	-0,01158712
14	0,07	-0,05	-0,00475393	-0,01258934
14	0,071	- 0,051	-0,00486613	-0,01280689
14	0,07	-0,05	-0,00475393	-0,01258934
14	0,068	-0,05	-0,0048395	-0,01241819
20	0,044	0,031	0,01004576	0,00032628
20	0,034	0,03	0,00862608	0,00105003
20	0,028	0,043	0,00971671	0,00327926
20	0,019	0,033	0,00713928	0,00272958
20	0,023	0,049	0,00993524	0,00449903
20	0,034	0,07	0,01433913	0,00632939
20	0,036	0,065	0,01388037	0,00549833
20	0,036	0,062	0,01345189	0,00510237
20	0,037	0,06	0,01329392	0,00475283
20	0,035	0,032	0,00903942	0,00122842

Nota. Adaptado de (Autores)

Figura 73.*Banco de pruebas*

Nota. Adaptado de (Autores)

12. Carga eléctrica en un hogar

Considerando los siguientes dispositivos, en un hogar promedio se tiene que:

Figura 74.*Consumo promedio de energía en un hogar*

Electrodoméstico	Cantidad de electrodomésticos del mismo tipo	Tiempo de uso al mes en horas	Energía consumida al mes kWh	Valor de la energía
Bombillos ahorradores	10	2400	60.00	\$10635.51
Equipo de sonido	1	150	18.00	\$3190.65
Televisor	1	240	24.00	\$4254.20
Lavadora	1	10	7.00	\$1240.81
Nevera	1	-	50.00	\$8862.93
Licuadaora	1	6.666666660000001	2.33	\$413.60
Plancha	1	10	12.00	\$2127.10
Total Factura:			173.33	\$30724.81

Nota. Adaptado de (autores)

Tomando en cuenta que los dispositivos presentados en la figura 74, son los que estarían presentes en un hogar apartado, el consumo total del hogar sería de 173.33 Kwh/mes, cabe aclarar que estos valores pueden variar ya que están directamente relacionados con las horas de uso como con la inclusión de más dispositivos.

13. Factibilidad económica

La implementación de sistemas eólicos en lugares apartados aporta enormemente en la reducción o apoyo en la carga energética de hogares ubicados en zonas apartadas donde el servicio de energía es intermitente o no cuenta con él para esto se realizaron dos presupuestos en los cuales se observan el costo del prototipo y la estimación de costos del generador como se presentan en las tablas 17 y 18 respectivamente.

Tabla 17.*Presupuesto prototipo*

Concepto	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Gastos generales			
Papelería		\$ 50.000	\$ 50.000
Transporte	1	\$ 60.000	\$ 60.000
Equipos			
Impresión 3D	1	\$ 500.000	\$ 500.000
Soporte prototipo	1	\$ 85.000	\$ 85.000
Rodamientos	2	\$ 3.500	\$ 7.000
Motor 5V	1	\$ 4.500	\$ 4.500
Solución epóxica	4	\$ 5.000	\$ 20.000
Leds	5	\$ 200	\$ 1.000
Total			\$ 727.500

Nota. Adaptado de (Autores)

Tabla 18.*Presupuesto aerogenerador*

Concepto	Descripción	Material	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Turbina	Eje 2 *7/16"	AISI 1020	1	\$ 90.000	\$ 90.000
	Álabes Darrieus	polímero ABS	3	\$ 250.000	\$ 750.000
	Rotor Savonius	Aluminio 1060	1	\$ 600.000	\$ 600.000
	Brazos	AISI 1020	2	\$ 100.000	\$ 200.000
	Tornillos M10x1,5x45	AISI 1020	8	\$ 7.500	\$ 60.000
	Tornillos M10x1,5x70	AISI 1020	12	\$ 10.000	\$ 120.000
	Rodamientos radiales 39-40-20	AISI 1020	2	\$ 25.000	\$ 50.000
Bastidor	Unión eje	AISI 1020	1	\$ 30.000	\$ 30.000
	Carcaza	AISI 1020	4	\$ 50.000	\$ 200.000
	Soportes	AISI 1020	4	\$ 60.000	\$ 240.000
	Tornillos M10x1,5x45	AISI 1020	12	\$ 7.500	\$ 90.000
Generador	Discos rotor	AISI 1020	2	\$ 15.000	\$ 30.000
	imán N35	Neodimio	20	\$ 40.000	\$ 800.000
	Estator	Cobre	10	\$ 50.000	\$ 500.000
	Tornillo M12x1,75x90	AISI 1020	4	\$ 12.000	\$ 48.000
Circuito eléctrico	Inversor	-	1	\$ 192.000	\$ 192.000
	Controlador MPPT	-	1	\$ 390.000	\$ 390.000
	Batería	-	1	\$ 135.000	\$ 135.000
				Subtotal	\$ 4.525.000
Otros					
Mano de obra					\$ 600.000
					\$
TOTAL					\$ 5.125.000

Nota. Adaptado de (Autores)

Los precios de referencia fueron tomados en base a lo consultado en páginas web, tales como Homecenter, MercadoLibre, Madecentro, y de establecimientos tales como ferreterías. Los precios de las piezas no comerciales se cotizaron en talleres de metalmecánica ubicados en el centro de Bucaramanga donde también se cotizaron los procesos de manufactura.

14. Ficha técnica del aerogenerador

Tabla 19.

Especificación del aerogenerador

Tipo	Especificación
Principio de operación	Fuerza sustentación
Altura del rotor	1,6 m
Altura total incluido bastidor	2,34 m
Diámetro del rotor	1,487 m
Peso	60 Kg
Número de alavés	3
Solidez rotor	0,42
Velocidad viento arranque	4,9 m/s
Velocidad viento critica	12 m/s
Potencia nominal	283,1 W
Potencia útil	80 W
Potencia útil/día	1,92 Kwh/día

Nota. Adaptado de (Autores)

15. Comparativa aerogenerador comercial

Figura 75.

Generador eólico de eje vertical comercial.



Turbina eólica vertical de 1000w y 24v, generador de viento de 250 RPM, 24v, 48v, 96 v, 3 fases, 50HZ, 3 aspas, sin ruido, para uso doméstico

Ten lista la cesta antes

PRECIO:

COP 5,656,338.25 - 6,619,119.23

PROMO DEL 11.11
Comienza el
11 nov. a las 00:00 PT

COP 8,273,899.04

COP 13,163.02 Cupones para ti

COP 18,804.32 dto. por cada COP 1,124,498.10

Conseguir cupones

Voltaje: 48 V

48 V

96V

120 V

Especificaciones: with inverter

only wind turbine

with inverter

Cantidad:

-

1

+

5% dto. (2 unidades o más)
20 unidades disponibles

Envío: COP 4,769,489.10

a Colombia por UPS Expedited

Fecha estimada de entrega el 26 NOV

Nota. Adaptado de (Aliexpress)

Se observa que, en cuanto a precios netos de generador, el adquirir un aerogenerador de eje vertical de forma comercial supone una diferencia muy marcada, con lo cual se hace altamente factible el realizar la fabricación de este.

15. Conclusiones

- La potencia nominal del aerogenerador es de unos 283,1 W; mientras que la potencia útil al día viene siendo de unos 1,92 Kwh/día, cuya potencia cumple uno de los objetivos planteados en este proyecto de alimentar una pequeña casa de la mesa de los santos con una potencia entre (1-2) Kwh/día, dicha potencia bastaría para encender unos 10 bombillos ahorradores al día o mantener funcionando la nevera de la casa, si se quiere ampliar la generación de energía para el hogar, una opción viable es desarrollar un sistema mixto de aerogenerador-panel solar que permita suplir con mayor capacidad el consumo eléctrico del hogar.
- Del análisis estructural realizado mediante el software CAD/CAE SolidWorks se encontró que las cargas aplicadas a la estructura del aerogenerador no superan el límite elástico de los materiales implementados, estando estas cargas muy por debajo del límite del material, además que el desplazamiento de cada una de las piezas durante la aplicación de las cargas fue inferior a 1 mm.
- Al momento de construir el prototipo del aerogenerador el polímero PLA supone diferentes factores a tener en cuenta tales como; el acabado superficial, geometría de las piezas, porcentaje de relleno y calidad de la impresión ya que supuso dificultades para construcción y ensamblaje de las piezas lo cual afecto directamente el rendimiento del prototipo.
- Los datos registrados mediante el software SCADA presentaron errores debido a la falta de mantenimiento del túnel de viento, la suciedad acumulada en este mismo y el tiempo inoperativo del equipo, lo cual afecto de forma directa los valores medidos.
- El número de Reynolds hallado en el túnel de viento se asemejo a los valores del estudio realizado en el área de trabajo que es la mesa de los santos.

- Con la velocidad proporcionada en el túnel de viento de 5.06 m/s se pudo comprobar que el aerogenerador cumple con la velocidad de arranque, debido a que las condiciones normales de operación son a una velocidad de viento de 5.9 m/s.
- Para el experimento en el cual se busca medir el rendimiento del perfil aerodinámico DU06-W-200 se observó que los valores arrojados por parte del software no eran coherentes por motivos de la des calibración del equipo utilizado, Ya que aunque se mantuvieran fijos los parámetros de entrada (potencia del ventilador) los datos que arrojaba el software variaban de manera abrupta, esto se debió a factores tales como: suciedad en el sistema, poco uso de los equipo, calidad de la maquina y falta mantenimiento en el mismo.
- Debido a que las dimensiones del túnel de viento eran de 30 x 30 cm y el espacio para introducir el aerogenerador en el mismo era de 25 cm, se optó por implementar unas dimensiones de 21 cm de diámetro y 23.5 cm de altura del álabe del prototipo del aerogenerador. El factor de escala implementado para el aerogenerador de tamaño real fue de 6.67 veces mayor al del prototipo, dando como resultado una altura del álabe de 1.57 m y un diámetro de 1.4 m.

16. Recomendaciones

- Es crucial el tramitar con mucha antelación el uso de equipos de la universidad, ya que estos debido a la pandemia estuvieron mucho tiempo no operativos, por lo cual se ocasionan problemas como des calibración y falta de mantenimiento afectando fuertemente los datos que los equipos arrojen.

- Si se piensa realizar nuevamente pruebas en el túnel de viento utilizando la misma geometría y material, es de vital importancia que el equipo a utilizar se encuentre calibrado y que el material utilizado el cual fue polímero PLA, sea impreso con una calidad muy superior.

Referencias Bibliográficas

- Abb. (2012). *Cuaderno de aplicaciones técnicas, plantas eólicas*. Barcelona: torrent de l'olla.
- Acciona. (s.f.). *Energías renovables*. Obtenido de energía eólica:
<https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-eolica/>
- Arbeláez jaramillo, n., & ochoa palacio, d. (2013). *Diseño de detalle de un generador eólico tipo savonius*. Envigado.
- Bloombergnef. (1 de septiembre de 2020). *La energía solar y eólica alcanzan el 67% de la nueva capacidad de energía agregada a nivel mundial en 2019, mientras que los combustibles fósiles caen al 25%*. Obtenido de <https://about.bnef.com/blog/solar-and-wind-reach-67-of-new-power-capacity-added-globally-in-2019-while-fossil-fuels-slide-to-25/>
- Boukios, s., costopoulos, t., kois, v., thanou, l., & tsantiotis, d. (2007). *Design and maintenance of wind turbines transmission*. Athens: national technical university of athens.
- Carolina espitia caita, & lilian johanna puerto molina. (2014). *Diseño y construcción de un mini aerogenerador de eje vertical*. Universidad militar nueva granada.
- Cepal. (2017). *El cambio climático, las políticas públicas y la demanda de energía y gasolinas en américa latina. Síntesis de políticas públicas sobre cambio climático*. Obtenido de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45698/1/s1700150_es.pdf
- Cifuentes, r. L. (2013). *Guía eólica desarrollo de proyectos pequeños y medianos*. Santiago de chile: rodrigo calderón vieytes.
- Departamento de energía, e. (2007). *Sistemas eólicos pequeños para generación de electricidad*. Nuevo méxico.

Diego martínez navarro. (2016). Diseño de un sistema de generación de energía eléctrica basado en la utilización de las energías solar y eólica, e integrado en el medio natural.

Universidad politécnica de cartagena.

Educativo, r. (s.f.). *Descripción de la tecnología eólica*. Obtenido de descripción de la tecnología eólica: <https://rinconeducativo.org/es/recursos-educativos/descripcion-de-la-tecnologia-eolica>

Energías renovables (iv) energía eólica. (s.f.).

Enrique arriols. (octubre de 2020). *Ventajas y desventajas de la energía eólica*. Obtenido de ecologia verde: <https://www.ecologiaverde.com/ventajas-y-desventajas-de-la-energia-eolica-1085.html>

Eoliccat. (s.f.). *¿cómo funciona un aerogenerador?* Obtenido de <http://eoliccat.net/principios-de-la-energia-eolica/como-funciona-un-aerogenerador/?lang=es>

Epm. (s.f.). *Parque eólico jepírachi*. Obtenido de <https://www.epm.com.co/site/home/nuestra-empresa/nuestras-plantas/energia/parque-eolico>

Gabriel pico saltos, roberto pico saltos, & daniel mendoza. (2018). Turbinas hidrocínicas de eje vertical helicoidal. *Roca. Revista científico - educacional de la provincia granma*, 14(1).

Ing. Nuria nelly mendoza cerón. (noviembre de 2017). Diseño de un generador eólico de eje vertical tipo darrieus helicoidal de 3 kw". *Instituto tecnológico de pachuca*.

Manwell, j., mcgowan, j., & rogers, a. (2009). *Wind energy explained theory, design and application*. Chippenham: wiley.

Menna. (s.f.). *Como funciona un aerogenerador*. Obtenido de <https://como-funciona.co/un-aerogenerador/>

- Milena molina galindo. (2016). Diseño de un aerogenerador que permita generar energia electrica en el colegio ofelia uribe de acosta comunidad de yomasa. *Universidad catolica de colombia*.
- Nawfal m ali, dr.sattar aljabair, & dr.abdul hassan a.k. (s.f.). An experimental and numerical investigation on darrieus vertical axis wind turbine types at low wind speed. *International journal of mechanical & mechatronics engineering ijme-ijens*, 19(06), 14.
- Opexenergy operación y mantenimiento s.l. (s.f.). *Tipos de aerogeneradores*. Obtenido de eólica: http://opex-energy.com/eolica/tipos_aerogeneradores.html#1._segun_el_eje_de_giro_del_rotor.
- Procolombia. (23 de abril de 2020). *El sector energético colombiano cuenta con todas las garantías para seguir adelante*. Obtenido de <https://procolombia.co/noticias/covid-19/el-sector-energetico-colombiano-cuenta-con-todas-las-garantias-para-seguir-adelante>
- Renovatec. (s.f.). *Clasificación de los aeoregeneradores*. Obtenido de <http://www.mantenimientodeaerogeneradores.com/index.php/clasificacion-de-aerogeneradores>
- Rincón educativo. (s.f.). *Descripción de la tecnología eólica*. Obtenido de descripción de la tecnología eólica: <https://rinconeducativo.org/es/recursos-educativos/descripcion-de-la-tecnologia-eolica>
- Serrano, j., arroyo, a., canteli, m., martínez, r., & capellán, c. (2017). *Energías renovables (iv) energía eólica*. Santander: universidad de cantabria.
- Solidworks. (11 de septiembre de 2018). *Solidbi*. Obtenido de solidbi: <https://solidbi.es/solidworks/>

Twidale, s. (16 de diciembre de 2019). La demanda mundial de carbón se mantendrá estable hasta 2024: iea. *Reuters*. Obtenido de <https://www.reuters.com/article/us-iea-coal-iduskbn1yl005>

Unidad de planeación minero energética upme. (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en colombia. 38-39. Obtenido de http://www.upme.gov.co/estudios/2015/integracion_energias_renovables/integracion_energias_renovables_web.pdf

Xm. (octubre de 2020). Informe mensual de demanda de energía octubre 2020. *Informe general del mercado octubre 2020*. Obtenido de https://www.xm.com.co/informes%20mensuales%20de%20analisis%20del%20mercado/0_0_general_mercado_10_2020.pdf

Apéndices

Apéndice A. Coordenadas perfil aerodinámico DU06-W-200.

De la siguiente tabla se observan las coordenadas (x,y) que permiten generar un plano 2D del perfil aerodinámico DU06-W-200 en SolidWorks para luego realizar el diseño de este en 3D.

DU 06-W-200 VAWT airfoil

1.000030	0.000330
0.995071	0.000991
0.988745	0.001790
0.980844	0.002821
0.971354	0.004134
0.960703	0.005676
0.949361	0.007380
0.937673	0.009188
0.925781	0.011064
0.913799	0.012967
0.901782	0.014892
0.889754	0.016828
0.877727	0.018779
0.865704	0.020741
0.853697	0.022719
0.841679	0.024714
0.829686	0.026717
0.817740	0.028741
0.805771	0.030796
0.793799	0.032857
0.781854	0.034939
0.769889	0.037053
0.757924	0.039180
0.746007	0.041327

0.734077	0.043511
0.722128	0.045716
0.710225	0.047936
0.698325	0.050176
0.686453	0.052417
0.674589	0.054685
0.662687	0.056949
0.650773	0.059221
0.638859	0.061480
0.626934	0.063716
0.615006	0.065934
0.603147	0.068109
0.591292	0.070229
0.579430	0.072307
0.567547	0.074343
0.555676	0.076339
0.543792	0.078282
0.531879	0.080195
0.519984	0.082060
0.508056	0.083885
0.496115	0.085679
0.484187	0.087431
0.472242	0.089147
0.460354	0.090814
0.448446	0.092426
0.436599	0.093990
0.424787	0.095466
0.413003	0.096877
0.401290	0.098182
0.389595	0.099392
0.377963	0.100483

0.366361	0.101453
0.354814	0.102282
0.343266	0.102969
0.331726	0.103514
0.320178	0.103912
0.308593	0.104180
0.297054	0.104309
0.285489	0.104290
0.273928	0.104142
0.262419	0.103851
0.250920	0.103406
0.239441	0.102815
0.228016	0.102074
0.216637	0.101172
0.205318	0.100103
0.194052	0.098861
0.182866	0.097447
0.171792	0.095845
0.160792	0.094042
0.149938	0.092038
0.139170	0.089806
0.128563	0.087366
0.118128	0.084689
0.107876	0.081772
0.097863	0.078610
0.088085	0.075175
0.078586	0.071484
0.069402	0.067515
0.060586	0.063284
0.052175	0.058794
0.044254	0.054063

0.036871	0.049124
0.030107	0.044037
0.024057	0.038898
0.018781	0.033816
0.014332	0.028930
0.010681	0.024359
0.007756	0.020195
0.005460	0.016479
0.003720	0.013151
0.002419	0.010168
0.001446	0.007489
0.000702	0.005102
0.000259	0.002932
0.000038	0.000944
0.000046	-0.000911
0.000385	-0.002855
0.000980	-0.004968
0.001862	-0.007256
0.003065	-0.009755
0.004630	-0.012507
0.006653	-0.015533
0.009224	-0.018871
0.012477	-0.022518
0.016534	-0.026484
0.021456	-0.030740
0.027288	-0.035182
0.033970	-0.039704
0.041417	-0.044177
0.049507	-0.048508
0.058159	-0.052655
0.067244	-0.056572

0.076717	-0.060244
0.086510	-0.063669
0.096591	-0.066865
0.106888	-0.069816
0.117402	-0.072555
0.128085	-0.075067
0.138941	-0.077391
0.149918	-0.079520
0.161017	-0.081472
0.172199	-0.083251
0.183459	-0.084857
0.194835	-0.086310
0.206246	-0.087627
0.217718	-0.088783
0.229267	-0.089822
0.240824	-0.090722
0.252445	-0.091498
0.264104	-0.092160
0.275771	-0.092709
0.287455	-0.093136
0.299179	-0.093459
0.310901	-0.093673
0.322646	-0.093783
0.334386	-0.093785
0.346164	-0.093688
0.357917	-0.093494
0.369702	-0.093194
0.381483	-0.092805
0.393277	-0.092315
0.405087	-0.091739
0.416892	-0.091073

0.428714	-0.090318
0.440534	-0.089484
0.452348	-0.088562
0.464176	-0.087561
0.475993	-0.086480
0.487811	-0.085322
0.499605	-0.084091
0.511354	-0.082780
0.523068	-0.081386
0.534692	-0.079904
0.546245	-0.078317
0.557686	-0.076620
0.569025	-0.074781
0.580320	-0.072781
0.591592	-0.070620
0.602880	-0.068293
0.614212	-0.065812
0.625585	-0.063191
0.637030	-0.060434
0.648597	-0.057558
0.660268	-0.054610
0.671981	-0.051627
0.683701	-0.048657
0.695430	-0.045719
0.707153	-0.042807
0.718795	-0.039964
0.730458	-0.037180
0.742078	-0.034463
0.753726	-0.031815
0.765344	-0.029234
0.776960	-0.026740

0.788585	-0.024315
0.800182	-0.021981
0.811752	-0.019742
0.823301	-0.017617
0.834860	-0.015593
0.846387	-0.013685
0.857897	-0.011903
0.869394	-0.010249
0.880860	-0.008731
0.892291	-0.007367
0.903719	-0.006160
0.915150	-0.005108
0.926586	-0.004214
0.938030	-0.003470
0.949424	-0.002872
0.960662	-0.002393
0.971321	-0.001989
0.980723	-0.001708
0.988627	-0.001544
0.994978	-0.001364
0.999970	-0.001169

Nota. Adaptado de (Airfoiltools)

Apéndice B. Ecuaciones del EES usados para los cálculos.

El presente anexo contiene el proceso de cálculo y formulas utilizadas para desarrollo en proyecto.

"Velocidad del viento"

$$V = 5,9 \text{ "m/s"}$$

$$n_m = 0,95 \text{ "eficiencia mecánica"}$$

$$n_e = 0,85 \text{ "eficiencia eléctrica"}$$

$$C_p = 0,35 \text{ "coeficiente de potencia"}$$

"eficiencia total"

$$n_t = n_m * n_e * C_p$$

"potencia a entregar"

$$P_{\text{util}} = 80 \text{ "W"}$$

"Potencia nominal"

$$P_n = P_{\text{util}} / n_t$$

"Dimensiones del rotor"

$$\rho_a = 1,25 \text{ "Kg/m}^3\text{" "densidad del aire"}$$

$$P_n = 0,5 * \rho_a * A * V^3$$

"Area rotor"

$$A = D * h$$

"PARAMETROS DE DISEÑO"

"TSR"

$$TSR = 4$$

" Relación de aspecto de álabe (AR)"

$$AR = l/c$$

$$AR = 8$$

"Longitud álabes [l] m"

"Cuerda del perfil m"

"solidez"

$$S = 0,42$$

$$S=(N*c^2*AR)/A$$

$$N= 3 \text{ "número de álabes"}$$

$$D= N*c/S \text{ "Diámetro rotor"}$$

"Consideraciones aerodinámicas"

$$R=D/2$$

$$TSR= (\omega*R)/ V$$

$$\omega= (2*\pi*rev)/60$$

"Torque total"

$$T= P_n/\omega$$

$$Cd=0,876 \text{ "coeficiente de resistencia"}$$

$$Cl=0,0853 \text{ "coeficiente de sustentación"}$$

"Velocidad de los álabes m/s"

$$W=V+\omega*R$$

"Fuerza de arrastre N"

$$Fd= (1/2)*(Cd*\rho_a*c*l*W^2)$$

"Fuerza de sustentación N"

$$Fl= (1/2)*(Cl*\rho_a*c*l*W^2)$$

"Fuerza resultante N"

$$Fr=\sqrt{Fd^2+Fl^2}$$

Apéndice C. Tabla de valores del software SCADA.

El Presente anexo contiene el registro de todos los datos suministrados por parte del software SCADA durante la realización de las pruebas de laboratorio.

Time(s)	AVE- 1(%)	SANG- 1(°)	SF- 1(N)	SF-2 (+)(N mm)	SF- 3(N)	SP- 11(mmwc)	SP- 12(mmwc)	delta h m	Velocidad	Reynolds	SF-2 (-) (N mm)	SV- 1(m/s)	Cd(S)()	AIR FLOW(m3/s)	CL(S)()	Cm+(S l)()	Cm - (S l)()
691	20	2	-0,047	0,04	0,056	-9,9	-5,9	0,0040	8,00	108790,10	-0,69	4,8	100	0	0	100	0
692	20	2	-0,047	0,03	0,056	-9,8	-5,9	0,0039	7,90	107421,62	-0,65	4,7	100	0	0	100	0
693	20	2	-0,047	0,02	0,057	-9,7	-5,9	0,0038	7,79	106035,48	-0,77	4,7	100	0	0	100	0
694	20	2	-0,055	-0,01	0,032	-10	-5,9	0,0041	8,10	110141,58	-0,74	4,7	100	0	0	0	0
695	20	2	-0,046	0	0,033	-9,7	-5,9	0,0038	7,79	106035,48	-0,72	4,8	100	0	0	0	0
696	20	2	-0,049	-0,01	0,04	-10	-5,9	0,0041	8,10	110141,58	-0,73	4,9	100	0	0	0	0
697	20	2	-0,046	-0,01	0,032	-10,1	-5,9	0,0042	8,19	111476,68	-0,72	4,9	100	0	0	0	0
698	20	2	-0,054	-0,02	0,048	-9,8	-6	0,0038	7,79	106035,48	-0,81	4,7	100	0	0	0	0
699	20	2	-0,045	-0,01	0,042	-9,7	-6	0,0037	7,69	104630,97	-0,78	4,7	100	0	0	0	0
700	20	2	-0,044	0	0,054	-9,8	-5,9	0,0039	7,90	107421,62	-0,75	4,7	0	0	0	100	0
1476	25	2	0,093	0,21	0,023	-12	-6,5	0,0055	9,38	127567,70	-0,81	5,3	0,001	0,481	0,005	0,012	0
1477	25	2	0,091	0,2	0,023	-12	-6,6	0,0054	9,29	126402,68	-0,79	5,5	0,001	0,491	0,005	0,011	0
1478	25	2	0,088	0,3	0,011	-11,8	-6,5	0,0053	9,20	125226,81	-0,8	5,3	0,001	0,478	0,005	0,017	0
1479	25	2	0,087	0,23	0,015	-11,7	-6,4	0,0053	9,20	125226,81	-0,8	5,3	0,001	0,477	0,005	0,013	0
1480	25	2	0,089	0,06	0,01	-11,9	-6,5	0,0054	9,29	126402,68	-0,78	5,3	0,001	0,476	0,005	0,003	0
1481	25	2	0,091	0,13	0,017	-11,8	-6,4	0,0054	9,29	126402,68	-0,8	5,4	0,001	0,483	0,005	0,007	0
1482	25	2	0,092	0,09	0,021	-11,9	-6,3	0,0056	9,46	128722,18	-0,8	5,4	0,001	0,489	0,005	0,005	0
1483	25	2	0,066	0,06	0,025	-11,9	-6,4	0,0055	9,38	127567,70	-0,82	5,4	0,001	0,49	0,004	0,003	0
1484	25	2	0,079	0,1	0,028	-12	-6,4	0,0056	9,46	128722,18	-0,78	5,5	0,002	0,495	0,004	0,005	0
1485	25	2	0,096	0,17	0,048	-11,9	-6,5	0,0054	9,29	126402,68	-0,76	5,5	0,003	0,493	0,005	0,009	0
1757	30	2	0,089	0,07	0,04	-13,4	-7,1	0,0063	10,03	136530,49	-0,66	5,8	0,002	0,523	0,004	0,003	0
1758	30	2	0,089	0,11	0,04	-13,4	-7,2	0,0062	9,96	135442,58	-0,64	6,1	0,002	0,552	0,004	0,005	0

1759	30	2	0,089	0,11	0,04	-13,4	-7,3	0,0061	9,87	134345,87	-0,67	5,9	0,002	0,534	0,004	0,005	0
1760	30	2	0,089	0,1	0,04	-13	-7,2	0,0058	9,63	131000,63	-0,63	5,8	0,002	0,522	0,004	0,005	0
1761	30	2	0,089	0,09	0,04	-13,3	-7,2	0,0061	9,87	134345,87	-0,61	5,9	0,002	0,529	0,004	0,004	0
1762	30	2	0,089	0,1	0,04	-13,2	-7,2	0,0060	9,79	133240,12	-0,68	5,9	0,002	0,529	0,004	0,005	0
1763	30	2	0,089	0,09	0,04	-13,5	-7,3	0,0062	9,96	135442,58	-0,67	5,9	0,002	0,534	0,004	0,004	0
1764	30	2	0,089	0,11	0,04	-13,5	-7,2	0,0063	10,03	136530,49	-0,69	6	0,002	0,542	0,004	0,005	0
1765	30	2	0,089	0,11	0,04	-13,4	-7,1	0,0063	10,03	136530,49	-0,71	6,1	0,002	0,545	0,004	0,005	0
1766	30	2	0,089	0,11	0,041	-13,3	-7,1	0,0062	9,96	135442,58	-0,67	6,1	0,002	0,551	0,004	0,005	0
2250	20	14	0,085	1,6	0,038	-9,7	-6	0,0037	7,69	104630,97	-0,42	4,8	100	0	100	100	0
2251	20	14	0,086	1,6	0,035	-9,4	-6	0,0034	7,37	100299,52	-0,4	4,7	100	0	100	100	0
2252	20	14	0,086	1,58	0,035	-9,1	-5,9	0,0032	7,15	97304,83	-0,43	4,7	100	0	100	100	0
2253	20	14	0,086	1,6	0,035	-8,9	-5,7	0,0032	7,15	97304,83	-0,46	4,7	100	0	100	100	0
2254	20	14	0,086	1,59	0,035	-9	-5,8	0,0032	7,15	97304,83	-0,47	4,8	100	0	100	100	0
2255	20	14	0,086	1,59	0,035	-8,9	-5,7	0,0032	7,15	97304,83	-0,47	4,9	100	0	100	100	0
2256	20	14	0,086	1,6	0,035	-8,9	-5,8	0,0031	7,04	95772,37	-0,5	4,9	100	0	100	100	0
2257	20	14	0,086	1,6	0,035	-9	-5,8	0,0032	7,15	97304,83	-0,5	4,7	100	0	100	100	0
2258	20	14	0,086	1,59	0,036	-8,9	-5,8	0,0031	7,04	95772,37	-0,5	4,7	100	0	100	100	0
2259	20	14	0,086	1,6	0,036	-8,9	-5,8	0,0031	7,04	95772,37	-0,45	4,7	100	0	100	100	0
2748	25	14	0,085	0,93	0,046	-9,9	-6,2	0,0037	7,69	104630,97	-0,32	5,3	0	0	100	100	0
2749	25	14	0,083	0,93	0,032	-9,8	-6,2	0,0036	7,59	103207,35	-0,35	5,5	0	0	100	100	0
2750	25	14	0,084	0,92	0,036	-9,9	-6	0,0039	7,90	107421,62	-0,36	5,3	0	0	100	100	0
2751	25	14	0,087	0,94	0,04	-9,8	-6,2	0,0036	7,59	103207,35	-0,36	5,3	0	0	100	100	0
2752	25	14	0,087	0,93	0,039	-9,9	-6,4	0,0035	7,48	101763,82	-0,35	5,3	0	0	100	100	0
2753	25	14	0,089	0,95	0,039	-10,1	-6,3	0,0038	7,79	106035,48	-0,34	5,4	0	0	100	100	0
2754	25	14	0,088	0,93	0,039	-10	-6,4	0,0036	7,59	103207,35	-0,3	5,4	0	0	100	100	0
2755	25	14	0,087	0,95	0,038	-10,1	-6,1	0,0040	8,00	108790,10	-0,32	5,4	0	0	100	100	0
2756	25	14	0,087	0,94	0,039	-9,9	-6,2	0,0037	7,69	104630,97	-0,36	5,5	0	0	100	100	0
2757	25	14	0,087	0,94	0,039	-10	-6,2	0,0038	7,79	106035,48	-0,34	5,5	0	0	100	100	0
3231	30	14	0,065	2,08	-0,043	-13,8	-7,5	0,0063	10,03	136530,49	-0,44	6,2	0	0,554	0,003	0,09	0

3232	30	14	0,067	2,11	-0,045	-13,7	-7,4	0,0063	10,03	136530,49	-0,42	6,1	0	0,546	0,003	0,094	0
3233	30	14	0,066	2,08	-0,045	-13,7	-7,4	0,0063	10,03	136530,49	-0,45	6,1	0	0,548	0,003	0,091	0
3234	30	14	0,065	2,08	-0,043	-13,5	-7,5	0,0060	9,79	133240,12	-0,47	5,9	0	0,529	0,003	0,098	0
3235	30	14	0,065	2,08	-0,047	-13,6	-7,3	0,0063	10,03	136530,49	-0,49	5,9	0	0,533	0,003	0,097	0
3236	30	14	0,066	2,08	-0,045	-13,5	-7,4	0,0061	9,87	134345,87	-0,43	6,1	0	0,549	0,003	0,092	0
3237	30	14	0,07	2,04	-0,05	-13,5	-7,6	0,0059	9,71	132125,12	-0,46	5,8	0	0,519	0,003	0,1	0
3238	30	14	0,071	2,07	-0,051	-13,5	-7,6	0,0059	9,71	132125,12	-0,48	5,7	0	0,517	0,004	0,102	0
3239	30	14	0,07	2,09	-0,05	-13,5	-7,4	0,0061	9,87	134345,87	-0,48	5,8	0	0,523	0,003	0,101	0
3240	30	14	0,068	2,12	-0,05	-13,6	-7,5	0,0061	9,87	134345,87	-0,42	6	0	0,537	0,003	0,097	0
3543	20	20	0,066	5,52	0,061	-8,9	-5,8	0,0031	7,04	95772,37	-0,37	4,8	100	0	100	100	0
3544	20	20	0,062	5,51	0,029	-8,9	-5,9	0,0030	6,92	94214,99	-0,42	4,7	100	0	100	100	0
3545	20	20	0,061	5,51	0,048	-9	-5,9	0,0031	7,04	95772,37	-0,38	4,7	100	0	100	100	0
3546	20	20	0,063	5,47	0,022	-8,8	-5,8	0,0030	6,92	94214,99	-0,38	4,7	100	0	100	100	0
3547	20	20	0,064	5,47	0,017	-8,7	-5,8	0,0029	6,81	92631,43	-0,36	4,8	100	0	100	100	0
3548	20	20	0,065	5,47	0,013	-8,7	-5,8	0,0029	6,81	92631,43	-0,38	4,9	100	0	100	100	0
3549	20	20	0,06	5,49	0,065	-9	-5,9	0,0031	7,04	95772,37	-0,38	4,9	100	0	100	100	0
3550	20	20	0,06	5,53	0,065	-9,2	-6	0,0032	7,15	97304,83	-0,4	4,7	100	0	100	100	0
3551	20	20	0,064	5,52	0,053	-8,9	-5,8	0,0031	7,04	95772,37	-0,42	4,7	100	0	100	100	0
3552	20	20	0,065	5,49	0,048	-8,9	-5,8	0,0031	7,04	95772,37	-0,4	4,7	100	0	100	100	0
3991	25	20	0,066	2,61	0,029	-9,9	-6	0,0039	7,90	107421,62	-0,71	5,3	100	0	100	100	0
3992	25	20	0,066	2,62	0,035	-10	-6,2	0,0038	7,79	106035,48	-0,84	5,5	100	0	100	100	0
3993	25	20	0,064	2,61	0,032	-10,1	-6,2	0,0039	7,90	107421,62	-0,78	5,3	100	0	100	100	0
3994	25	20	0,065	2,66	0,034	-10,3	-6,2	0,0041	8,10	110141,58	-0,8	5,3	100	0	100	100	0
3995	25	20	0,065	2,64	0,028	-10,1	-6,3	0,0038	7,79	106035,48	-0,81	5,3	100	0	100	100	0
3996	25	20	0,068	2,92	0,04	-10,4	-6,3	0,0041	8,10	110141,58	-0,8	5,4	100	0	100	100	0
3997	25	20	0,062	3,26	0,03	-10,3	-6,3	0,0040	8,00	108790,10	-0,83	5,4	100	0	100	100	0
3998	25	20	0,063	3,27	0,032	-10,4	-6,4	0,0040	8,00	108790,10	-0,79	5,4	100	0	100	100	0
3999	25	20	0,066	3,25	0,046	-10,2	-6,3	0,0039	7,90	107421,62	-0,81	5,5	100	0	100	100	0
4000	25	20	0,065	3,26	0,057	-10,3	-6,3	0,0040	8,00	108790,10	-0,79	5,5	100	0	100	100	0

4341	30	20	0,044	3,61	0,031	-13,8	-7,3	0,0065	10,19	138680,71	-0,4	6,1	0,002	0,551	0,001	0,158	0
4342	30	20	0,034	3,68	0,03	-13,8	-7,2	0,0066	10,27	139743,42	-0,13	6,2	0,003	0,561	0,001	0,154	0
4343	30	20	0,028	3,59	0,043	-13,5	-7,2	0,0063	10,03	136530,49	-0,19	6,2	0,003	0,558	0,002	0,152	0
4344	30	20	0,019	3,57	0,033	-13,5	-7,2	0,0063	10,03	136530,49	-0,21	6,1	0,003	0,546	0,002	0,158	0
4345	30	20	0,023	3,54	0,049	-13,6	-7,1	0,0065	10,19	138680,71	-0,24	6,2	0,003	0,556	0,002	0,151	0
4346	30	20	0,034	3,27	0,07	-13,4	-7,1	0,0063	10,03	136530,49	-0,55	6,2	0,001	0,556	0,001	0,14	0
4347	30	20	0,036	3,44	0,065	-13	-7,3	0,0057	9,55	129866,40	-0,68	5,9	0,001	0,527	0,002	0,164	0
4348	30	20	0,036	3,85	0,062	-13,1	-7,3	0,0058	9,63	131000,63	-0,61	5,5	0,001	0,499	0,003	0,205	0
4349	30	20	0,037	3,64	0,06	-13,8	-7,4	0,0064	10,11	137609,80	-0,51	5,9	0	0,532	0,002	0,17	0
4350	30	20	0,035	3,43	0,032	-14	-7,4	0,0066	10,27	139743,42	-0,44	6,2	0	0,556	0,002	0,146	0

Nota. Adaptado de (Autores)

Apéndice D. Dimensiones prototipo.

En el presente anexo se descartan las características principales tomadas en cuenta del prototipo de aerogenerador.

Ficha técnica del prototipo a escala		
Parámetros	Unidades	Valores
Diámetro [D]	m	0,21
Altura [h]	m	0,235
Longitud cuerda [c]	m	0,0294
Área total [A]	m ²	0,0496
Tip speed ratio [TSR]	adimensional	4
N° álabes	adimensional	3
Aspect ratio [AR]	adimensional	8
Coefficiente de potencia [Cp]	adimensional	0,35
solidez [σ]	adimensional	0,42

Nota. Adaptado de (Autores)

Apéndice E. Planos.

En el presente anexo se encontrarán los planos de diseño correspondiente al aerogenerador.