

	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS		CÓDIGO	FO-GS-15	
			VERSIÓN	02	
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN			FECHA	03/04/2017
				PÁGINA	1 de 1
ELABORÓ		REVISÓ	APROBÓ		
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad	Líder de Calidad		

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES):

NOMBRE(S): BRIAN LLOYD

APELLIDOS: PÉREZ JARAMILLO

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR:

NOMBRE(S): JOSE RAFAEL

APELLIDOS: EUGENIO LOPEZ

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): DISEÑO MECANICO Y CONSTRUCCIÓN EN IMPRESIÓN 3D DE UN PROTOTIPO DE TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL

RESUMEN

El diseño se basó en el análisis de datos de los vientos de la ciudad de Cúcuta. El estudio fue basado en un modelo adecuado de acuerdo a las velocidades obtenidas en el análisis de datos obtenidas por el IDEAM y la estación meteorológica del aeropuerto Camilo Daza. Con el cual como resultado se obtuvo la Distribución de Weibull de vientos en la ciudad de Cúcuta. Obteniendo La velocidad y el prototipo experimental de la turbina eólica de eje vertical. El tipo de turbina es un rotor tipo Lenz con modificación de los perfiles aerodinámicos de los alabes para conseguir un mejor aprovechamiento por fuerzas de arrastre. El diseño se basa en la velocidad media presentada en la ciudad de Cúcuta, esta es la que presenta una mayor probabilidad. Adicionalmente se calcula la potencia generada y el dimensionamiento primario del prototipo. Se llego a la conclusión de que La turbina eólica diseñada en el presente trabajo puede suplir pequeñas cantidades de energía, como lo pueden ser cargadores de baterías de celular o portátiles, también para cargar sistemas de almacenamiento de energía de pequeños sistemas de iluminación led.

PALABRAS CLAVE: Turbina eólica, eje vertical, impresión 3D, prototipo, diseño mecanico

CARACTERISTICAS:

PÁGINAS: 83 PLANOS: 0 ILUSTRACIONES: 45 CD ROOM: 1

DISEÑO MECANICO Y CONSTRUCCIÓN EN IMPRESIÓN 3D DE UN PROTOTIPO DE
TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL

BRIAN LLOYD PÉREZ JARAMILLO

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERIA MECÁNICA

SAN JOSE DE CUCUTA

2022

DISEÑO MECANICO Y CONSTRUCCIÓN EN IMPRESIÓN 3D DE UN PROTOTIPO DE
TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL

BRIAN LLOYD PÉREZ JARAMILLO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de

Ingeniero Mecánico

Director:

ING. JOSE RAFAEL EUGENIO LOPEZ

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERIA MECÁNICA

SAN JOSE DE CUCUTA

2022

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE UN TRABAJO DE GRADO

FECHA: CÚCUTA, 1 DE NOVIEMBRE 2022
HORA: 3:00 p.m.
LUGAR: LABORATORIO DE FLUTER (FU306) UFPS
PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA MECÁNICA

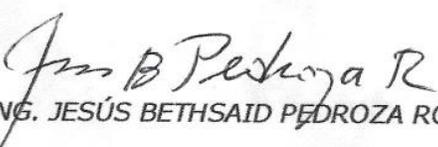
TÍTULO: "DISEÑO MECÁNICO Y CONSTRUCCIÓN EN IMPRESIÓN 3D DE UN
PROTOTIPO DE TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL."

Jurados: ING. JESÚS BETHSAID PEDROZA ROJAS
ING. GONZALO DE LA CRUZ ROMERO GARCÍA

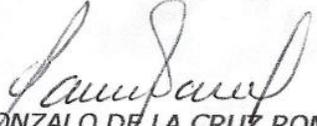
Director: ING. JOSÉ RAFAEL EUGENIO LÓPEZ

Nombre del estudiante	Código	Calificación	
		Letra	Número
BRIAN LLOYD PEREZ JARAMILLO	1121803	Cuatro, Cuatro	4.4

APROBADA


ING. JESÚS BETHSAID PEDROZA ROJAS


ING. GONZALO DE LA CRUZ ROMERO GARCÍA


Vo.Bo GONZALO DE LA CRUZ ROMERO GARCÍA
Coordinador Comité Curricular
Ingeniería Mecánica

Resumen

La crisis energética y el impacto ambiental, ha dejado una gran preocupación. En primer lugar, la crisis de la energía, al mismo tiempo como consecuencia del elevado consumo, ha producido mayor gasto de los recursos naturales y de la mano ha provocado graves daños en el medio ambiente deteriorando nuestro planeta. Esto ha provocado que países desarrollados y subdesarrollados se interesen y desvíen su mirada hacia las fuentes de energía renovables alternativas como la Energía Eólica.

La energía eólica es una fuente de energía renovable, no contamina, es inagotable y reduce el uso de combustibles fósiles, origen de las emisiones de efecto invernadero que causan el calentamiento global. En este orden de ideas este trabajo está enfocado en el diseño mecánico y construcción en impresión 3d de un prototipo de turbina eólica de eje vertical, en el cual se propone diseñar y construir una turbina Eólica.

El diseño se basó en el análisis de datos de los vientos de la ciudad de Cúcuta. El estudio fue basado en un modelo adecuado de acuerdo a las velocidades obtenidas en el análisis de datos obtenidas por el IDEAM y la estación meteorológica del aeropuerto Camilo Daza. Con el cual como resultado se obtuvo la Distribución de Weibull de vientos en la ciudad de Cúcuta. Obteniendo La velocidad y el prototipo experimental de la turbina eólica de eje vertical.

El tipo de turbina es un rotor tipo Lenz con modificación de los perfiles aerodinámicos de los alabes para conseguir un mejor aprovechamiento por fuerzas de arrastre. El diseño se basa en la velocidad media presentada en la ciudad de Cúcuta, esta es la que presenta una mayor probabilidad. Adicionalmente se calcula la potencia generada y el dimensionamiento primario del prototipo.

Posterior a esto se determina la solidez de la turbina, la relación de aspecto de alabe el cual establece la relación entre la longitud del alabe y la cuerda de este mismo. Como resultado de estos datos obtenemos el cálculo de la cuerda y el diámetro del rotor. posterior se modela el prototipo en el software cad y finalmente se construye en impresión 3D, el modelo definitivo de acuerdo a los resultados obtenidos.

Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. El problema	16
1.1 Planteamiento del problema	16
1.2 Formulación del problema	17
1.3 Justificación	17
1.4 Objetivos	18
1.4.1 Objetivo general	18
1.4.2 Objetivos específicos.	18
1.5 Antecedentes	19
1.6 Organización del libro	22
2. Marco teórico	23
2.1 Energía Eólica	23
2.2 Origen y perspectivas de la energía eólica	23
2.3 Variación del viento con la altura sobre el terreno	24
2.4 La potencia del viento	25
2.5 Medición de la velocidad del viento	26
2.6 Distribución de Weibull	27
2.7 La rosa de vientos	28
2.8 Vientos en Colombia	28
2.9 Turbinas Eólicas	30
2.10 Turbinas eólicas de eje vertical	32
2.10.1 Rotor Savonius.	33
2.10.2 Prototipo Savonius helicoidal.	34

2.10.3 Rotor Darrieus	35
2.10.4 Rotor Darrieus de Álabes Rectos o Tipo H.	36
2.11 Ventajas del rotor de eje vertical de álabes rectos	37
2.12 La ley de Betz y la máxima eficiencia de conversión	38
2.13 Turbina eólica de eje vertical de álabes rectos	42
2.13.1 Funcionamiento del rotor de eje vertical de álabes rectos.	45
2.14 Impresión 3D	46
2.14.1 Tres hechos aleatorios, interesantes e inesperados sobre la impresión 3D	49
2.15 Matlab	49
2.16 Solidworks	50
2.17 Simulink	51
3. Diseño de la turbina Eólica	52
3.1 Distribución Weibull	52
3.2 Rosa de los vientos	56
3.3 Diseño del prototipo	57
3.3.1 Cálculo de velocidad del viento.	58
3.3.2 Cálculo de la potencia generada.	58
3.3.3 Dimensionamiento primario del prototipo	59
3.3.4 Determinación de solidez	60
3.3.5 Relación de aspecto de alabe	62
3.3.6 Cálculo de la cuerda y diámetro del rotor.	63
3.3.7 Optimizador 1: Perfil aerodinámico	64
3.3.8 Optimizador 2: Perfiles helicoidales.	65
3.3.9 Modelado en 3D de Turbina a través de Software CAD.	66
4. Construcción del prototipo en impresión 3D	73
4.1 Introducción	73

4.2 Palas del rotor eólico	73
4.3 Rotor	75
4.4 Ensamble	75
5. Conclusiones	77
6. Recomendaciones	78
7. Referencias Bibliográficas	80

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Capacidad eólica mundial total instalada y previsiones 1997-2010.	23
Figura 2. Perfiles de velocidad de viento, en función de las características topográficas del terreno.	24
Figura 3. Potencia eólica específica en función de la velocidad para condiciones normales de presión y temperatura.	25
Figura 4. Medición en sitio de ubicación de la turbina.	26
Figura 5. Ejemplo de un histograma que ilustra la distribución de Weibull.	27
Figura 6. Ejemplo de una rosa de los vientos.	28
Figura 7. Velocidad Media del Viento en Superficies.	30
Figura 8. A) Aerogenerador de eje horizontal, B) Componentes de un HAWT.	31
Figura 9. Turbinas eólicas de eje vertical.	33
Figura 10. Funcionamiento del rotor Savonius.	34
Figura 11. Detalle de las turbinas Windside.	35
Figura 12. Rotor Darrieus tipo Troposkien	36
Figura 13. Rotor Darrieus de álabe recto	37
Figura 14. Velocidad antes y después de una turbina eólica	39
Figura 15. Curva de eficiencia de Betz	41
Figura 16. Turbina eólica de eje vertical de alabe recto.	42
Figura 17. Fuerzas que se generan en un álabe que compone un rotor de álabe recto.	44
Figura 18. Aerogenerador Darrieus de alabe recto o Tipo H.	45
Figura 19. Esquema de funcionamiento del Darrieus.	46

Figura 20. Logo de Matlab.	49
Figura 21. Logo solidworks	50
Figura 22. Distribución de Weibull de vientos en la ciudad de Cúcuta.	55
Figura 23. Datos de velocidad del viento de la ciudad de Cúcuta entre los intervalos de 01/01/2011 y 01/0/2021.	56
Figura 24. Rosa de los vientos Cúcuta.	56
Figura 25. Coeficiente de potencia para diferentes diseños de rotores eólicos	57
Figura 26. a) Incremento en el número de alabes. b) Incremento de la longitud de cuerda. c) Turbina eólica vertical con alta solidez.	61
Figura 27. a) Efecto de la solidez para el torque de arranque. b) Efecto de la solidez en el coeficiente de potencia C_p .	62
Figura 28. TSR vs C_p para varios valores de relación de aspecto de alabe.	63
Figura 29. Perfil tipo Lenz para el rotor eólico.	65
Figura 30. Perfil optimizador implementado en la pala del rotor (medidas en milímetros).	67
Figura 31. Descomposición de cilindro	67
Figura 32. Descripción geométrica de la ley tangente.	68
Figura 33. Guía Helice/espiral implementada en el modelo en solidworks.	69
Figura 34. Resultado de barrido extrusión en solidworks.	69
Figura 35. Vista detalle de las palas (cotas en mm).	70
Figura 36. Vista isométrica de las palas del rotor eólico.	70
Figura 37. Vista de perfil de las palas del rotor eólico.	71
Figura 38. Vista de alzado de las palas del rotor eólico.	71
Figura 39. Modelo 3d implementado en solidworks.	72

Figura 40. Vista isométrica, vista lateral y planta del modelo 3d implementado.	72
Figura 41. Impresión 3d prusa tairona	73
Figura 42. Fotografía de las palas impresas.	74
Figura 43. Modelo del rotor implementado	75
Figura 44. Elementos mecánicos usados para ensamblar el rotor.	76
Figura 45. Prototipo final implementado.	76

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Características de diseño de la turbina.

66

Introducción

Hoy en día existe una preocupación importante que se plantea en la sociedad, que demanda gran cantidad de esfuerzo en aspectos de investigación y desarrollo en la búsqueda de fuentes de energía alternativas que contribuyan a reducir la dependencia de combustibles fósiles.

Este estudio es de gran importancia, ya que involucra tecnologías que se pueden desarrollar para aprovechar recursos inagotables como lo es el viento.

Bajo este contexto se plantea desarrollar un prototipo de turbina eólica de eje vertical. Tomando en cuenta el análisis del recurso eólico para poder hallar la potencia neta que debe captar la turbina de eje vertical para producir una potencia útil de 1 watt de energía, posteriormente se plantean ecuaciones analíticas que permiten desarrollar a cabalidad el diseño mecánico de la turbina, con las dimensiones halladas como lo es la altura de la turbina, la longitud de cuerda del alabe, el diámetro del alabe y el área de barrido y otros aspectos como lo es la solidez y relación de aspecto (L/c) que debe tener el prototipo, de esta manera se logró modelar la turbina por medio del software CAD como lo es SolidWorks eligiendo el rotor tipo Lenz se procede a dar forma estructural a la turbina eólica de eje vertical, de esta manera se lleva el modelamiento a una impresora 3D la cual se encarga de construir físicamente el diseño establecido anteriormente con sus perfiles optimizadores en los alabes. Este diseño y construcción tiene como iniciativa de investigar y adoptar los principios y conocimientos en ingeniería mecánica involucradas en el funcionamiento de este tipo de máquinas.

Los sistemas eólicos se caracterizan en dos grupos; los cuales son de turbinas horizontales y verticales, las turbinas de eje horizontal son utilizadas en zonas con un gran recurso y donde sus dimensiones pueden ser entre 20 y 100 metros de altura y pueden alcanzar los 30 metros de

diámetro del rotor; este tipo de turbina puede clasificarse como de 1, 2 o tres palas. Por contraparte se tienen las turbinas eólicas de rotor vertical diseñadas para generar energía a velocidades bajas de viento, las turbinas más utilizadas para estos propósitos son las de tipo Savonius y Darrieus.

El diseño de las turbinas eólicas requiere de un análisis de recurso eólico y un análisis mecánico que cumpla con este requerimiento siendo reflejado en la selección de turbina, palas y dimensiones de diámetro altura y área de barrido.

A continuación, se darán a conocer los objetivos a cumplir para diseño mecánico y construcción en impresión 3d de un prototipo de turbina eólica de eje vertical.

1. El problema

1.1 Planteamiento del problema

La demanda energética mundial es mayoritariamente suplida por sistemas de generación convencionales como lo son las plantas termoeléctricas, las cuales funcionan combustionando materia prima como carbón, aceite o gas natural produciendo energía térmica que se transforma en energía mecánica por medio de un ciclo de compresión para posteriormente ser transformada en energía eléctrica por medio de un alternador. Como consecuencia de la combustión de estos elementos se producen residuos como son dióxido de carbono CO₂, óxido nitroso N₂O y metano CH₄ los cuales forman el grupo denominado gases de efecto invernadero y los cuales generan el efecto del calentamiento global; también se generan metales pesados que llegan a fuentes hídricas y contaminación del aire generando lluvia acida.

Por los motivos anteriores es necesario buscar alternativas tanto en sistemas eficientes que disminuyan el consumo de energía del usuario final como en sistemas de generación de energía eléctrica basados en energías renovables, de las cuales son más conocidas la energía solar, eólica e hidrocinética. De estas la más estudiada, la que presenta un conocimiento básico para su implementación y de la cual se tienen mayores sistemas comerciales es la energía solar, dentro de esta categoría se tienen los sistemas de generación de energía eléctrica por medio del efecto fotovoltaico y los sistemas de refrigeración, calefacción y ventilación solares.

Cúcuta es una ciudad que tiene un gran recurso solar y en la cual ya han sido instalados cantidad de sistemas solares tanto locales como integrados directamente en la red de distribución y transmisión nacional. Los sistemas eólicos en contraparte han sido pobremente estudiados debido a la cantidad de variables presentes en el diseño de estos sistemas, de los cuales se pueden

mencionar la velocidad media del viento, la dirección del viento, los diversos tipos de aerogeneradores tanto de eje vertical como horizontal y el terreno topográfico. Es por tanto una necesidad buscar alternativas de generación de energía eléctrica diversificada para la ciudad de Cúcuta por medio de investigaciones académicas con la ayuda del sector comercial.

De lo planteado anteriormente se tiene la necesidad de caracterizar el recurso eólico de la ciudad de Cúcuta y plantear alternativas de generación de energía eléctrica basados en sistemas eólicos que cumplan con criterios de confiabilidad y eficiencia, generando información que sirva de punto de partida para el interés y creación de aplicaciones en el campo académico y empresarial.

1.2 Formulación del problema

Con base a las formulaciones de los párrafos anteriores se podría formular la siguiente pregunta. ¿Es posible encontrar la ubicación ideal y el prototipo adecuado para la instalación de una turbina eólica de eje vertical que trabaje bajo las condiciones del recurso eólico establecidas para la ciudad de Cúcuta?

1.3 Justificación

El creciente interés de las energías renovables y el apoyo del gobierno nacional al sector eléctrico con la creación del decreto 030 de 2018 han creado la necesidad de generación de información concerniente a diseños, estudios experimentales y aplicaciones de los diferentes sistemas de generación eléctrica renovable y la integración de estos a la matriz energética nacional.

El presente estudio pretende caracterizar el recurso eólico de la ciudad de Cúcuta por medio de mediciones realizadas en las estaciones meteorológicas locales y su posterior procesamiento para

la determinación de viabilidad técnica en el uso de sistemas eólicos. Esta información también permitirá tener un precedente para el análisis de futuros proyectos basados en recursos eólicos.

El diseño mecánico asegurara la selección de la turbina eólica con las mejores especificaciones de funcionamiento, su configuración y dimensiones físicas. Los diseños mecánicos de la variedad turbinas eólicas están basados en las ecuaciones de ganancia de energía por efecto de desplazamiento de viento y sistemas rotacionales mecánicos, cada turbina con su configuración es probada experimentalmente realizando cambios en su configuración para mejorar el rendimiento, a este proceso se le conoce como optimización.

Realizar la correcta selección, de las estrategias de optimización, así como de un adecuado dimensionamiento físico permitirá el correcto funcionamiento de la turbina eólica diseñada, este proceso permitirá a un futuro mejorar el diseño ya sea agregando elementos mecánicos que mejoren el rendimiento o seleccionando diferentes perfiles del eje.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general. Diseñar y construir en impresión 3d un prototipo de turbina eólica de eje vertical.

1.4.2 Objetivos específicos. Analizar el recurso eólico de la ciudad de Cúcuta.

Diseñar mecánicamente turbina eólica de eje vertical.

Modelamiento en 3D de Turbina a través de Software CAD.

Construcción de prototipo de Turbina eólica mediante Impresión 3D.

1.5 Antecedentes

Orduz O. y Suarez J. (2011). Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia. (Tesis de grado). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. (World Wind Energy, 2006)

Resumen: En este trabajo se resaltan las ventajas de las máquinas de eje horizontal. El diseño contempla los aspectos generales del diseño de un rotor de eje vertical de alabe recto. Además, incluye el desarrollo de un alternador de imanes permanentes para acople directo al equipo. La metodología se encamina a aspectos técnicos y principios de ingeniería que gobiernan el funcionamiento de estas máquinas. Se expone el proceso de diseño, mencionando las variables involucradas en el cálculo, dimensionamiento, selección de parámetros de funcionamiento y elementos mecánicos del prototipo.

Castillo, J.. (2011). Small-scale vertical axis wind turbine design. (Tesis de grado). Tampere University of Applied Sciences. irkanmaa, Finlandia. (Orduz O. y Suarez J. ,2011).

Resumen: La tesis se centra en el diseño de un pequeño rotor de aerogenerador de eje vertical con madera maciza como material de construcción. El análisis aerodinámico se realiza implementando un modelo basado en el impulso en un programa informático matemático.

Se propone una turbina eólica de tres palas como candidata para más pruebas de prototipos después de evaluar el efecto de varios parámetros en la eficiencia, el par y la aceleración de la turbina.

Los resultados obtenidos indican que la madera es un material adecuado para la construcción de rotores y es necesario un mayor desarrollo del algoritmo informático para mejorar la simulación de las condiciones de flujo.

A. J. González Díaz, L. J. Geovo Coronado, Y. E. González Doria, “Diseño y modelamiento de un aerogenerador Vawt Darrieus tipo H para la zona costera del departamento de Córdoba”. *Ingeniare*, N°. 20, pp. 33-46, 2016. [3]

Para esta investigación se utilizó el perfil naca 0025 dada las condiciones de estabilidad dinámica en bajos números de Reynolds. Se eligió el rotor Darrieus tipo H de baja potencia y a través del modelado del rotor (usando el método DMST) se obtuvieron la dimensión óptima del perfil y el diámetro del aerogenerador. Con el software ANSYS se determinó el rendimiento, obteniendo una longitud de cuerda óptima de 0,55 m y un radio del rotor de 1,3 m. En comparación con los resultados obtenidos el DMST, respecto a las simulaciones realizadas en ANSYS, se tuvo como resultado una discrepancia del 15% para el máximo momento a la velocidad de giro nominal.

Gonzalez N. y Sanchez J. (2019). Diseño de un aerogenerador para la producción de energía eléctrica en la finca “el alto del gavilán”, Boyacá. (Tesis de grado). Fundación Universidad De América, Bogotá. [4]

Resumen: El proyecto está enfocado en el diseño de un aerogenerador para la producción de energía eléctrica en una zona rural de Boyacá de 4 KWh, enfocándose en la vivienda y el cercado eléctrico, para lo cual, se tiene que analizar el lugar y la disposición que se tiene del viento como elemento primario para la generación de energía.

Teniendo en cuenta lo anterior, se establecen parámetros básicos y requerimientos fundamentales, estableciendo alternativas de diseño donde se seleccionará la mejor alternativa, posteriormente, se realizará un diseño del aerogenerador seleccionado anteriormente, donde se calcularán los elementos externos e internos; se hará la respectiva simulación de la zona más crítica del aerogenerador a través de elementos finitos, en este caso será de la estructura del aerogenerador, seguido de los planos constructivos y los manuales de construcción, instalación, operación, mantenimiento y seguridad. Por último, se desarrollará un análisis de impacto ambiental por medio de la matriz CONESA o también llamada cualitativacuantitativa y el análisis financiero de la fabricación comparado con los aerogeneradores que se encuentran en el mercado.

Mendoza N. A. (2017). Diseño De Un Generador Eólico De Eje Vertical Tipo Darrieus Helicoidal De 3 Kw. (Tesis de grado). Tecnológico Nacional de Mexico. Ciudad de Mexico, Mexico.

Resumen: En el presente trabajo de tesis se detalla el procedimiento de diseño de una turbina eólica de eje vertical Darrieus de palas helicoidales específicamente para la zona de Pachuca. Para llegar a la meta establecida se utiliza una metodología de diseño la cual permita encarar las dificultades del proyecto.

Ya establecido el problema, se exponen las especificaciones del diseño comenzando por la localización de las necesidades y continuando con la propuesta del diseño de una turbina. Posteriormente al análisis de ingeniería, se dibujan los planos del generador eólico con el objetivo de fabricarlo además de probar su funcionamiento en condiciones reales de operación. Se establece material y costos, mano de obra y producción del prototipo.

Durante el desarrollo del diseño se utilizaron diferentes softwares para la realización del modelo CAD, cada uno de las piezas del prototipo se modelaron en SolidWorks, los análisis estáticos de esfuerzos y deformaciones se utilizó Ansys así como también SolidWorks , por otra parte para el cálculo de fuerzas se utilizo XFOIL.

1.6 Organización del libro

El trabajo está dividido en 7 capítulos, siendo el primero una introducción del tema donde se presenta de forma clara la descripción del problema y los objetivos de la tesis. El capítulo dos (2) describe los conceptos relacionados al tema de investigación. En el capítulo tres (3) es descrita la metodología de diseño y el modelado del prototipo en 3D. En el capítulo cuatro (4) es presentada la metodología para la construcción del prototipo, de los materiales y métodos adaptados para su construcción. El capítulo cinco (5) son presentadas las principales conclusiones obtenidas del trabajo. En el capítulo seis (6) son descritas las recomendaciones para futuros trabajos y finalmente en el capítulo siete (7) son presentadas las referencias bibliográficas consultadas en la realización de este trabajo.

2. Marco teórico

2.1 Energía Eólica

La energía eólica es la energía obtenida a partir del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es transformada en otras formas útiles para las actividades humanas.

2.2 Origen y perspectivas de la energía eólica

Todas las fuentes de energía renovables (excepto la mareomotriz y la geotérmica), e incluso la energía de los combustibles fósiles, provienen, en último término, del sol. Alrededor de un 2 por ciento de la energía proveniente del sol es convertida en energía eólica.

Existen varios tipos de compresores como son: el compresor de émbolo el cual se clasifica en diafragma y de pistón; compresores rotativos que se clasifican en multicelular, de tornillo helicoidal y Roots; y los turbocompresores que pueden ser radiales o axiales.

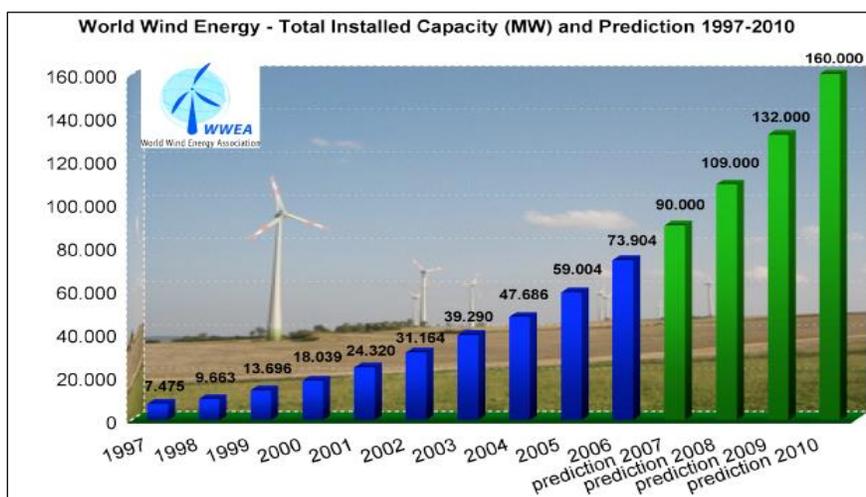


Figura 1. Capacidad eólica mundial total instalada y previsiones 1997-2010.

Fuente: (World Wind Energy, 2006)

En la actualidad, la energía eólica es utilizada principalmente para producir energía eléctrica mediante turbinas eólicas aerogeneradores. A finales de 2007, la capacidad mundial de los generadores eólicos fue de 94.1 GW (Ver figura 1). Genera alrededor del 1% del consumo de electricidad mundial, cabe resaltar que representa alrededor del 19% de la producción eléctrica en Dinamarca, 9% en España y Portugal, y un 6% en Alemania e Irlanda. En el año 2008 el porcentaje aportado por la energía eólica en España aumentó hasta un 11%.

2.3 Variación del viento con la altura sobre el terreno

El perfil del viento donde se toma la velocidad del mismo, varía como una función de la altura sobre el terreno. La forma de este perfil dependerá principalmente de la rugosidad del terreno. La figura 2 ilustra el comportamiento de perfil de velocidades del viento en función de las características topográficas del terreno.

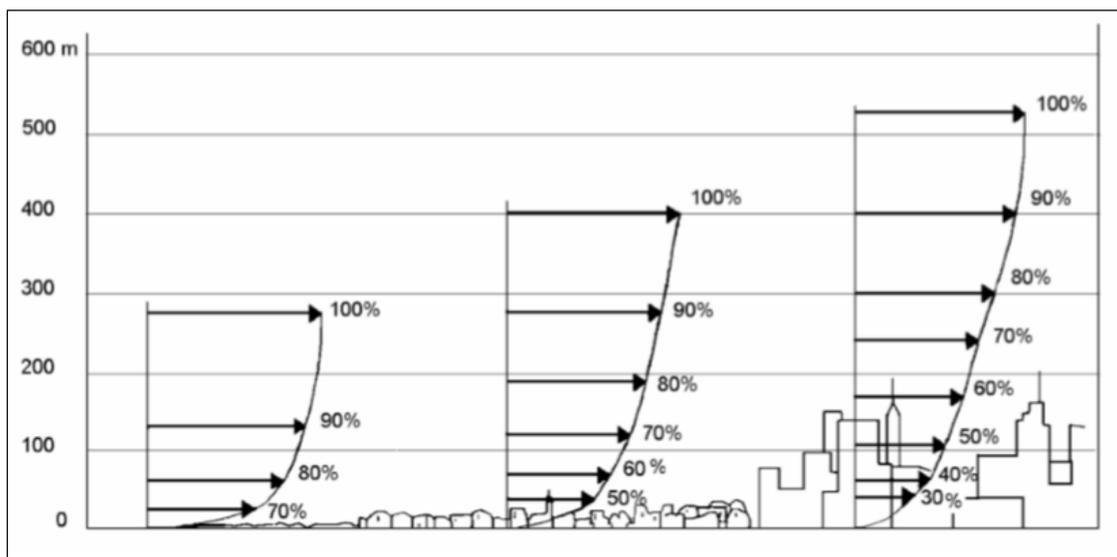


Figura 2. Perfiles de velocidad de viento, en función de las características topográficas del terreno.

Fuente: (Atlas del país vasco. 1993.)

2.4 La potencia del viento

La velocidad del viento es un factor muy importante para determinar cuanta energía un equipo puede transformar en electricidad: la cantidad de energía que tiene el viento varía con la tercera potencia de la velocidad media del viento (Figura 3).

$$P = \frac{1}{2} \rho A U_{\infty}^3 \quad (2.1)$$

Donde:

P: potencia del viento (W)

ρ : Densidad del aire (1,225 Kg/m³)

A: área enfrentada o de barrido (m²)

U_{∞}^3 : Es la velocidad del viento (m/s)

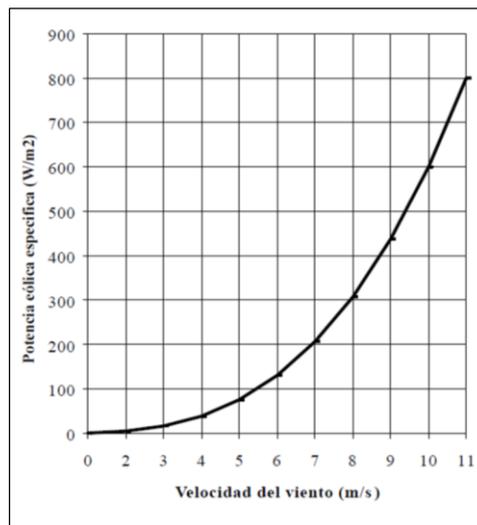


Figura 3. Potencia eólica específica en función de la velocidad para condiciones normales de presión y temperatura.

Fuente: Manual de aplicación de la Energía Eólica. 1997

2.5 Medición de la velocidad del viento

La mejor forma de medir la velocidad del viento en una futura localización de una turbina eólica es situar un equipo de medición, (que en su configuración básica consta de un anemómetro) en el extremo superior de un mástil que tenga la misma altura a la que se va a situar el equipo de generación. (Ver figura 4). Esto evita la incertidumbre que conlleva el recalcular la velocidad del viento a una altura diferente.

Situando el anemómetro en la parte superior del mástil se minimizan las perturbaciones de las corrientes de aire creadas por el propio mástil. Si el anemómetro está situado en la parte lateral del mástil es fundamental enfocarlo en la dirección de viento dominante para minimizar la sombra del viento sobre la torre.



Figura 4. Medición en sitio de ubicación de la turbina.

Fuente: (colombia.bioweb.co, s.f.)

2.6 Distribución de Weibull

Dadas las características tan dispersas y aleatorias de la energía eólica, la única manera de estudiar si un emplazamiento es adecuado o no, es utilizando la estadística. Para ello se recurre a la representación de la velocidad del viento como una variable aleatoria con una cierta función de distribución.

La variación del viento suele describirse utilizando la llamada Distribución de Weibull (Ver figura 5). Básicamente se trata de una distribución biparamétrica que define las características propias de un sitio de emplazamiento

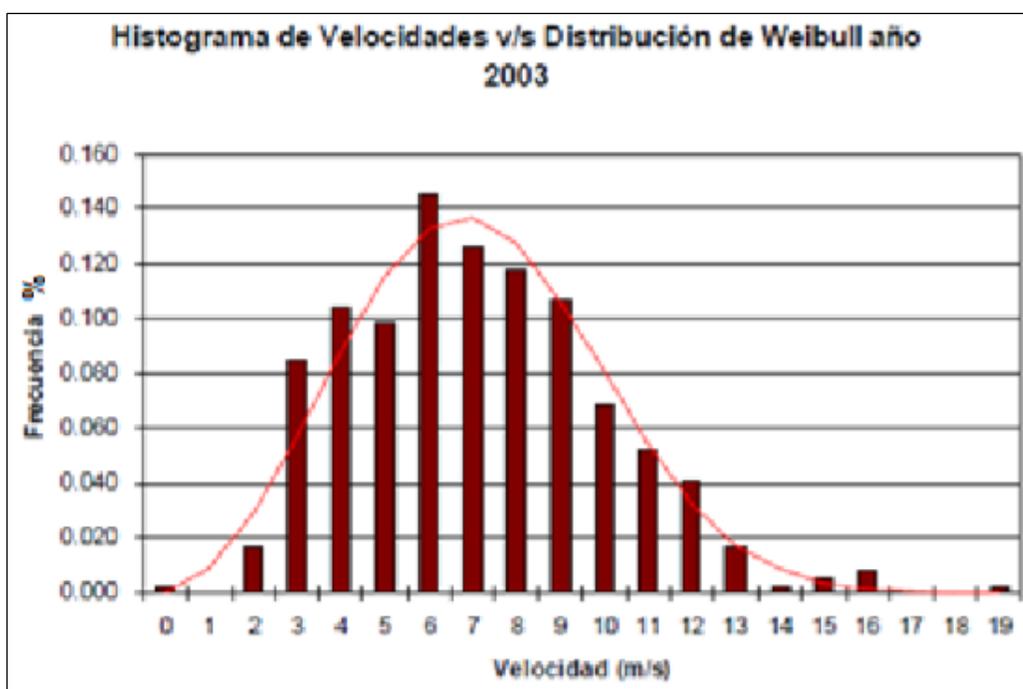


Figura 5. Ejemplo de un histograma que ilustra la distribución de Weibull.

Fuente: (Vásquez, 2007)

Como se puede observar, la distribución de las velocidades del viento es sesgada, es decir, no es simétrica. A veces se presentarán velocidades de viento altas, pero se presentan con menor

frecuencia. Por otro lado, las velocidades del viento cercanas a 6 m/s presentan mayor ocurrencia. Si se multiplica cada intervalo de la velocidad del viento por la probabilidad de tener esa velocidad particular, y se suman todos, se obtendrá el valor de la velocidad del viento media.

2.7 La rosa de vientos

Para mostrar la información sobre las distribuciones de velocidades del viento y la frecuencia de variación de las direcciones del viento, se utiliza la llamada rosa de vientos. (Figura 6)

Una rosa de los vientos proporciona información sobre las velocidades relativas del viento en diferentes direcciones.

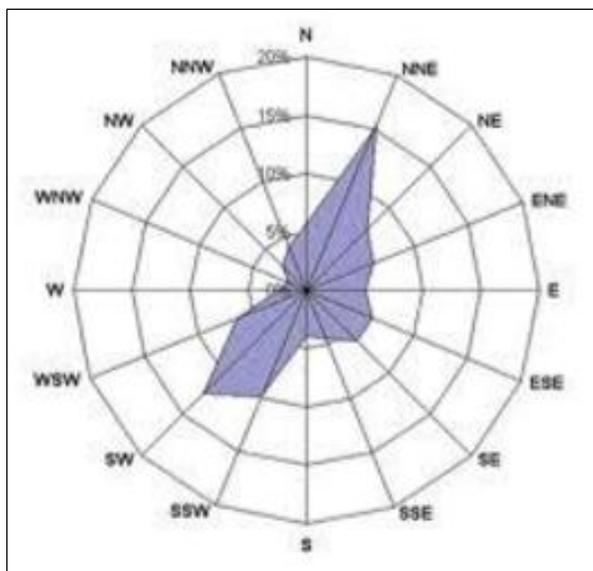


Figura 6. Ejemplo de una rosa de los vientos.

Fuente: (Ega-asociacioneolicagalicia.es, s.f.)

2.8 Vientos en Colombia

Las cordilleras colombianas tienen gran influencia en el clima del país, no solamente interfiriendo con los flujos atmosféricos, sino que debido a su absorción y emisión efectiva de

radiación solar, las cordilleras actúan como fuentes y sumideros de calor generando su propio patrón de circulación atmosférica (8). Los vientos en la región andina, en general son de baja velocidad y presentan predominantemente variaciones diurnas, independiente de la estación del año.

El país se encuentra bajo la influencia de los vientos alisios. Estos vientos cubren casi todas las regiones dentro de los cinturones subtropicales de alta presión y los ecuatoriales de baja presión. Entre diciembre y Enero (solsticio de verano en el hemisferio sur), los sistemas de presión y eólicos se desplazan hacia el sur. El cinturón de baja presión alcanza su posición más meridional hasta los 5° latitud sur.

Como resultado de esto, desde los meses de Diciembre a Marzo, las regiones del Caribe, los Llanos Orientales y parte de la región andina son influenciadas por los vientos alisios del noreste, los cuales provienen del hemisferio norte y penetran casi todo el territorio colombiano sin alcanzar el Ecuador. De una manera similar, el cinturón de baja presión alcanza su posición más septentrional hasta los 12° latitud norte alrededor del mes de Junio (verano en el hemisferio norte). Durante los meses siguientes hasta septiembre, los vientos alisios del sur prevalecen en la cordillera oriental y los Llanos Orientales. Como se puede observar ciertas regiones del país son influenciadas por los dos sistemas de vientos alisios, dependiendo de la estación del año.

Los vientos alisios del sur del Caribe están presentes sobre la región Caribe y el valle del Atrato durante los primeros cuatro meses del año. Normalmente, la presencia de los vientos alisios en esta región está asociada con escasez de lluvias. Los vientos en esta región son fuertes en las zonas planas del norte del país. Sobre la Península de la Guajira, valores de la velocidad de viento de superficie son típicamente altos (8 - 9 m/s promedio anual de velocidad) variando muy poco en dirección.

Otras regiones del país que presentan condiciones de viento interesantes para explorar como recurso energético son los Santanderes, las zonas montañosas del eje cafetero, en general, en las cercanías de los lagos como el lago Calima en el Valle, así como algunas zonas desérticas como en Villa de Leiva (Boyacá) y el Huila. (Figura 7)

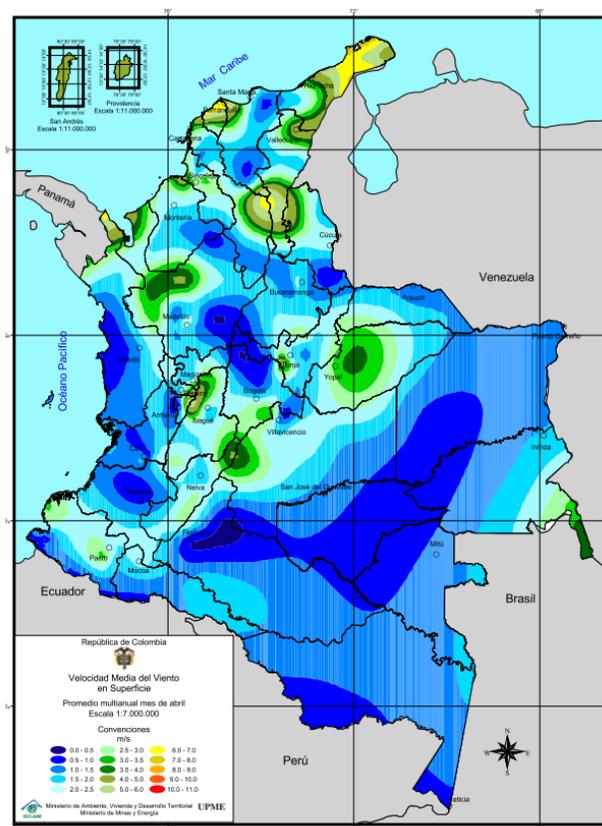


Figura 7. Velocidad Media del Viento en Superficies.

Fuente: Atlas del viento y la energía eólica de Colombia. UPME/IDEAM, 2006(6).

2.9 Turbinas Eólicas

En esencia, una turbina eólica o aerogenerador, es una turbomáquina motora que intercambia una cantidad de movimiento con el viento, haciendo girar un rotor. En estas máquinas, la energía cinética del aire en movimiento proporciona energía mecánica a un rotor o hélice que, a través de

un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, convirtiendo la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

Desde los primeros diseños de aerogeneradores para la utilización comercial, hasta los actuales, ha habido un progresivo crecimiento en la potencia de las turbinas eólicas de eje horizontal (alcanzando rotores de hasta 60 m de diámetro y alturas de torre de 80 m), con progresivos descensos en el costo de generación por Kw-h (Figura 8).

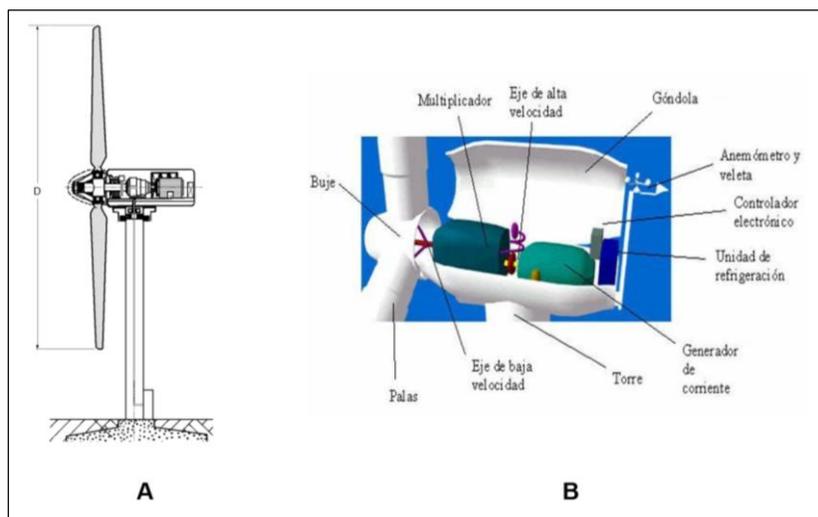


Figura 8. A) Aerogenerador de eje horizontal, B) Componentes de un HAWT.

Fuente: solarpedia.es

Todas las turbinas eólicas de eje horizontal tienen su eje de rotación principal en la parte superior de la torre, que tiene que orientarse hacia el viento de alguna manera. Dado que la velocidad de rotación de las aspas es baja, la mayoría hacen uso de una caja multiplicadora para aumentar la velocidad de rotación del generador eléctrico.

La mayor parte de la tecnología en energía eólica se refiere a aerogeneradores de esta clase. La razón es simple: todos los aerogeneradores comerciales conectados a la red se construyen actualmente con este tipo de rotor.

Por supuesto, la finalidad del rotor es la de convertir el movimiento lineal del viento en energía rotacional que pueda ser utilizada para hacer funcionar el generador. El mismo principio básico es el que se utiliza en las modernas turbinas hidráulicas, en las que la corriente de agua es paralela al eje de rotación de los álabes de la turbina.

2.10 Turbinas eólicas de eje vertical

Las turbinas eólicas o aerogeneradores de eje vertical, son aquellas en las que el eje de rotación se encuentra perpendicular al suelo. También se denominan VAWT (del inglés, Vertical Axis Wind Turbine (1)). Tienen la ventaja de adaptarse a cualquier dirección de viento. Trabajan, ya sea por la diferencia de coeficiente de arrastre entre las dos mitades de la sección expuesta al viento, o por la fuerza de sustentación que experimentan los perfiles aerodinámicos de que están hechos los álabes, al interactuar con la corriente de aire. Algunos desarrollos actuales se muestran en la figura 9. La diferencia de fuerzas en direcciones relativamente opuestas hace que el rotor sea propenso a girar sobre su eje en una dirección específica.

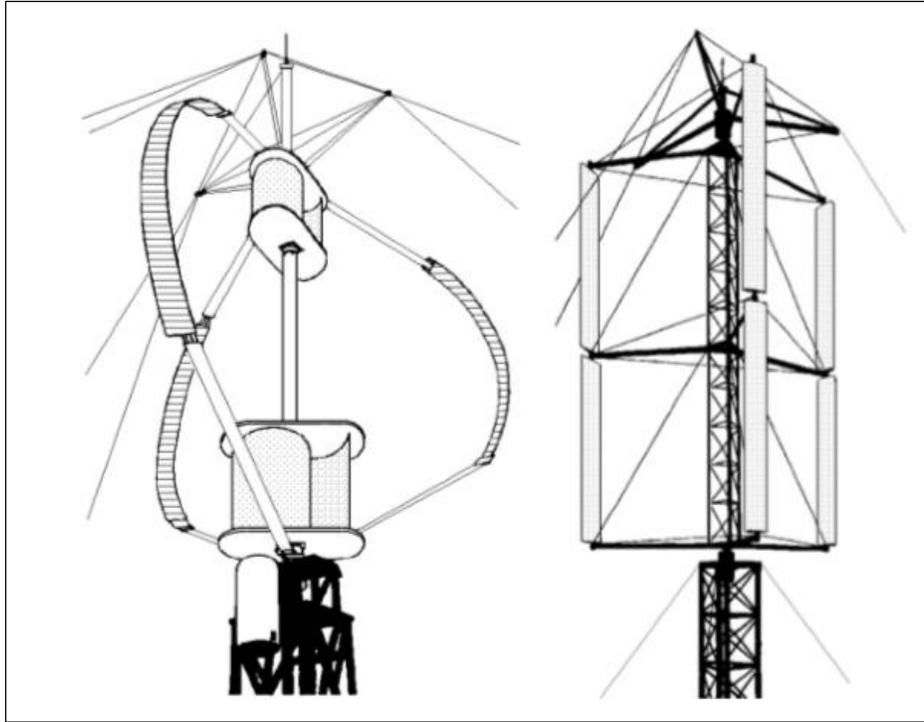


Figura 9. Turbinas eólicas de eje vertical.

Fuente: Energía Eólica, Pedro Fernández Díez

Uno de los principales componentes de una turbina eólica es el rotor, pues es el encargado de realizar la conversión primaria de la energía cinética de una corriente de viento, en energía mecánica rotacional en el eje del aparato. Recientemente se han desarrollado diversas adaptaciones, sin embargo los dos diseños básicos de rotores de eje vertical, son: el diseño Savonius y el Darrieus.

2.10.1 Rotor Savonius. Inventadas por el ingeniero finlandés Sigurd J. Savonius en 1922. Su principio de operación se basa en la fuerza de arrastre diferencial sobre dos superficies. Son dispositivos de arrastre que constan de dos o más palas, como se ve en la figura 9. Mirando el rotor

desde arriba, las palas forman la figura de una S. Debido a la curvatura, las palas experimentan menos resistencia cuando se mueven en contra del viento que a favor de él. (Figura 10)

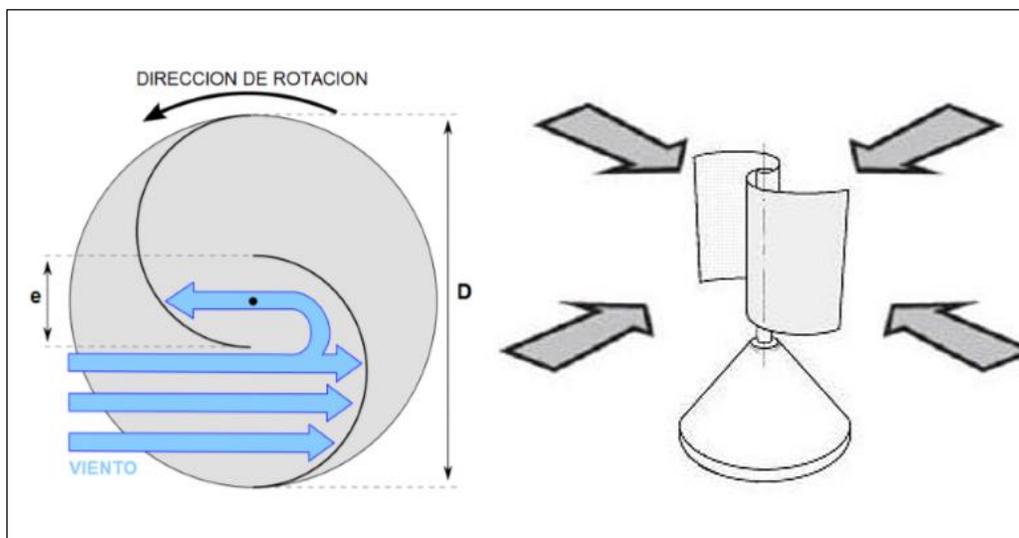


Figura 10. Funcionamiento del rotor Savonius.

Fuente: Energía Eólica, Pedro Fernández Díez

Esta diferencia causa que la turbina Savonius gire. Como es un artefacto de arrastre, este rotor extrae mucha menos de la fuerza del viento que las turbinas de sustentación de tamaño similar. Soporta las turbulencias y puede empezar a girar con vientos de baja velocidad. Es un tipo de turbina relativamente económica y fácil de implementar.

2.10.2 Prototipo Savonius helicoidal. Este novedoso aerogenerador de eje vertical es un prototipo concebido por la empresa finlandesa Windside.

En la figura 11 se puede apreciar un par de estos aerogeneradores capaces de entregar 50 Kw y que tienen la tarea de climatizar un centro comercial en las cercanías de Turku (Finlandia).



Figura 11. Detalle de las turbinas Windside.

Fuente: (www.windside.com/products.html, s.f.)

Esta tecnología relativamente nueva y prometedora, con rendimientos similares a los aerogeneradores de eje horizontal, es aplicada para abastecer medianos y pequeños consumos. El concepto aerodinámico es lo que lo hace distinto e interesante respecto a los otros VAWT.

2.10.3 Rotor Darrieus. Debe su nombre al ingeniero francés George Darrieus, quien patentó el diseño en 1931. Requiere vientos desde de 4 a 5 m/s, manteniendo grandes velocidades de giro y un buen rendimiento. Sus álabes son finas palas con forma de ala de avión, que están unidas al eje solo por los dos extremos, con una curva especial diseñada para un máximo rendimiento entre las dos uniones del eje (Figura 12). El modelo de curva más utilizado es el denominado Troposkien. Puede ser instalado en cualquier terreno sin necesidad de levantar altas torres.

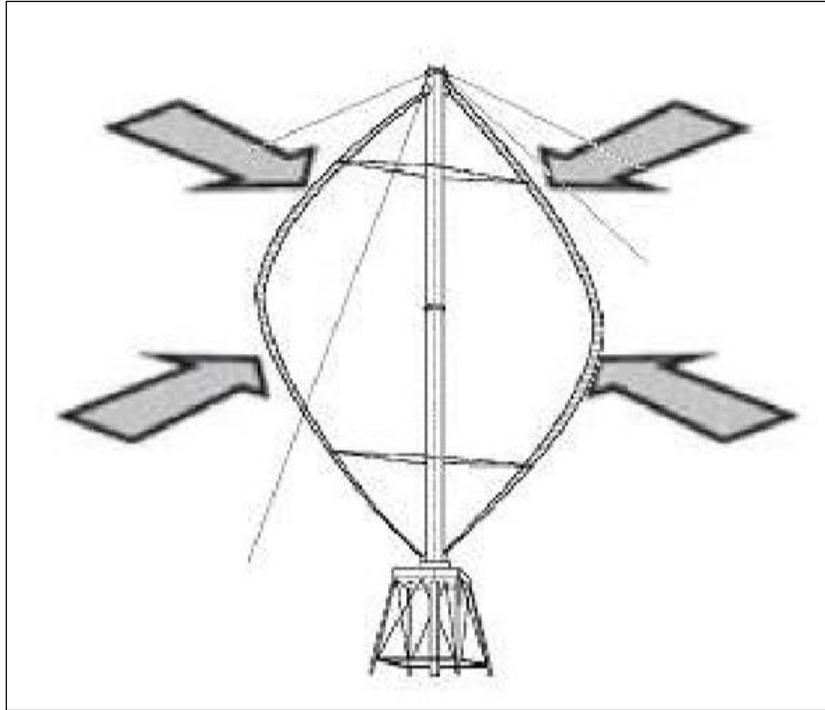


Figura 12. Rotor Darrieus tipo Troposkien

Fuente: (Fernández, s.f.)

Al trabajar en pura tensión hace que los alerones sean simples y económicos. Para algunas configuraciones, se presenta el inconveniente de un arranque que necesita algún tipo de asistencia, sin embargo se han desarrollado diseños con características constructivas especiales que otorgan esa capacidad de autoarranque.

2.10.4 Rotor Darrieus de Álabes Recto o Tipo H. Es un tipo de rotor que presenta un arreglo modificado proveniente del Darrieus original, donde los perfiles de los álabes son rectos a lo largo del área de barrido. Estos perfiles aerodinámicos están sujetos al eje de rotación. Esta configuración requiere de una mayor rigidez estructural, aunque una ventaja importante, es que el diseño de los álabes presenta simplicidad en su construcción (Figura 13).

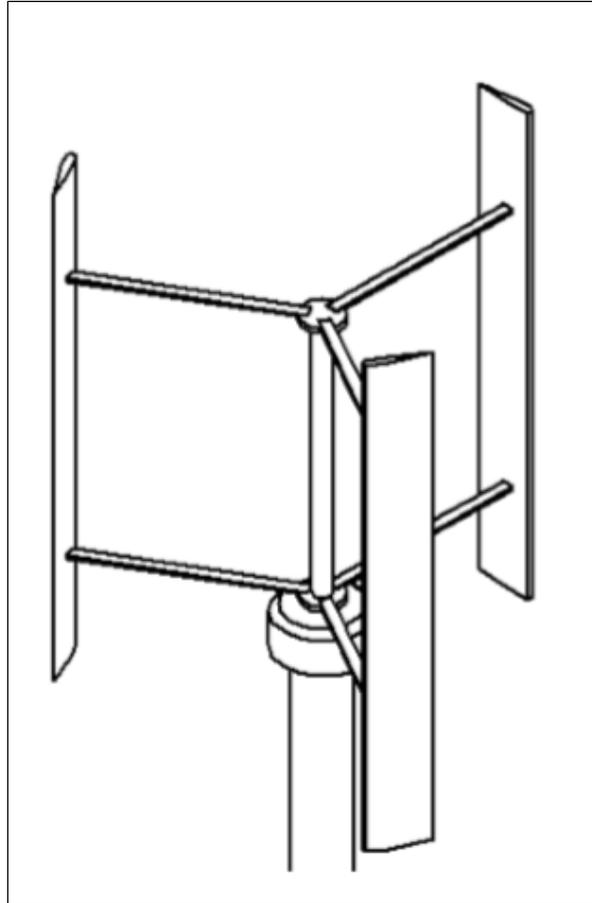


Figura 13. Rotor Darrieus de álabe recto

Fuente: (Orduz y Suarez, 2011)

2.11 Ventajas del rotor de eje vertical de álabe recto

Esta configuración de turbina presenta ciertas ventajas relativas respecto de las turbinas de eje horizontal. Si bien, el rendimiento de estas aun no experimenta un aumento como el de las segundas, actualmente se evidencia un creciente interés por investigar esta configuración en particular en aplicaciones de generación eléctrica de baja escala.

Entre las principales características se puede mencionar que:

Se pueden diseñar con perfiles aerodinámicos simétricos que facilitan la construcción de los alabes.

Son sistemas compactos que por lo general no requieren una torre demasiado alta y por tanto, un mantenimiento riguroso.

Su rendimiento llega a ser comparable con las turbinas de eje horizontal para ciertas configuraciones y condiciones de operación.

En general transmiten menores cargas a la estructura soporte. Requiriendo un buen balanceo de rotor.

Eficiencia de la conversión energética

A continuación se enuncian los conceptos, definiciones y leyes físicas de relevancia en la descripción del comportamiento, operación y rendimiento de las maquinas eólicas.

2.12 La ley de Betz y la máxima eficiencia de conversión

La ley de Betz fue formulada por el físico alemán Albert Betz en 1919. Su libro “Wind-Energie”, publicado en 1926, proporciona buena parte del conocimiento que en ese momento se tenía sobre energía eólica y aerogeneradores. Betz, define la potencia captada por un obstáculo que frena el movimiento libre del viento. Por clara conveniencia se considera un aerogenerador como obstáculo. (Figura 14)



Figura 14. Velocidad antes y después de una turbina eólica

Fuente: Adaptado de winpower.org (Danish Wind Industry Association, s.f.)

La potencia captada por el aerogenerador se define como la diferencia instantánea de la energía cinética del viento antes y después de pasar por el obstáculo en un tiempo dt . Esta relación entre las velocidades es formalizada por la ecuación 2.2:

$$P_{captado} = \frac{E_{ctn1} - E_{ctn2}}{\Delta t} = \frac{1}{2} \frac{\Delta m_{aire}}{\Delta t} x (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.2)$$

Donde,

Δm_{aire} : masa de aire captada por la turbina.

$v_1, 2$: velocidad antes y después de la turbina.

Otra manera para definir la masa de aire que pasa por el aerogenerador se logra considerando el promedio de las velocidades antes y después del obstáculo, ecuación 2.3:

$$\frac{\Delta m_{aire}}{\Delta t} = \frac{\rho x A x (v_1^2 + v_2^2)}{2} \quad (2.3)$$

Donde,

ρ Densidad del aire

A: área barrida por la turbina

V1, 2: velocidad del viento antes y después

Sustituyendo la masa del aire con lo expresado en la ecuación anterior:

$$P_{captado} = \frac{1}{4} x \rho x A x (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) \quad (2.4)$$

Donde,

ρ Densidad del aire

A: área barrida por la turbina

V1, 2: velocidad del viento antes y después

Luego se define la razón entre la potencia captada sobre potencia del viento definida por la ecuación siguiente, donde v será v1:

$$\frac{P_{captado}}{P_{viento}} = \frac{1}{2} x \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \right) x \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right) \quad (2.5)$$

Donde,

V1, 2: velocidad del viento antes y después

Lo anterior permite definir una función P_{cap}/P_{viento} vs v_2/v_1 tal como se muestra en la figura 15:

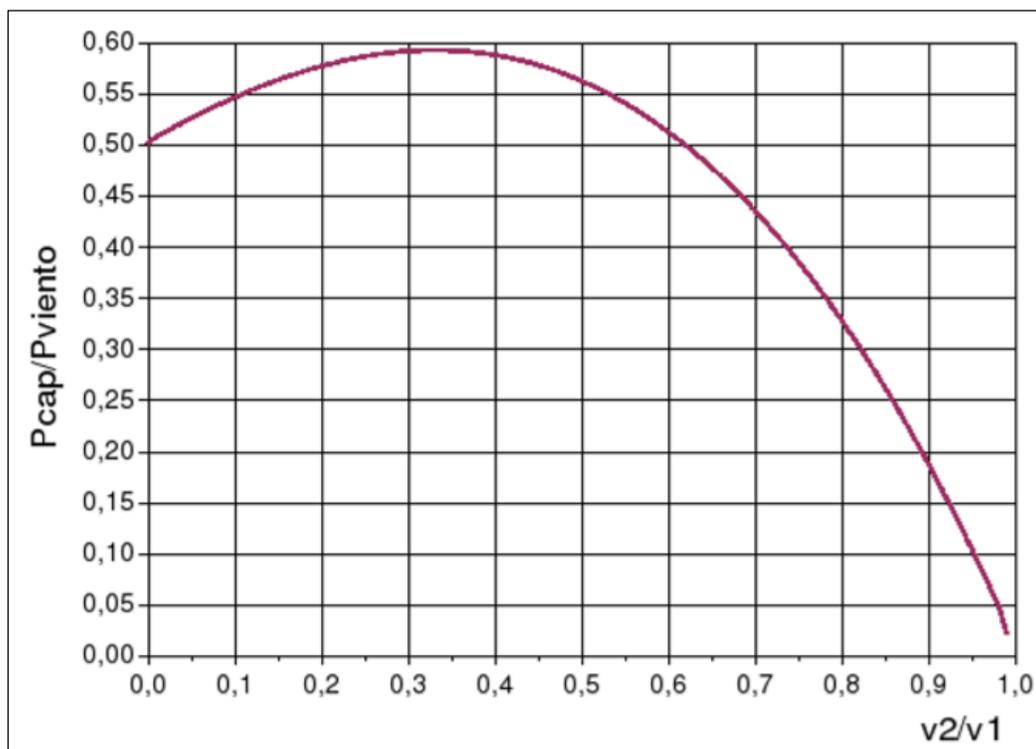


Figura 15. Curva de eficiencia de Betz

Fuente: adaptado winpower.org

La curva obtenida anteriormente define un máximo en 0,31 con una potencia máxima captada de $P_{captada} = 16/27 \cdot P_{viento}$.

Como resumen de esto se define la relación aproximada tal como aparece en la ecuación y se denomina Ley de Betz y representa la máxima cantidad de energía del viento que se puede transformar en energía mecánica rotacional.

$$\frac{P_{\text{captado}}}{P_{\text{viento}}} = 0.59 \quad (2.6)$$

Esta ecuación 2.6 es un límite teórico ideal ya que no considera los siguientes factores reales de operación:

Resistencia aerodinámica de las palas. La compresibilidad del fluido La interferencia de las palas

2.13 Turbina eólica de eje vertical de álabe recto

Esta turbina consta de una serie de perfiles aerodinámicos (álabes) normalmente verticales montadas sobre un eje giratorio. (Figura 16)



Figura 16. Turbina eólica de eje vertical de alabe recto.

Fuente: (Archiexpo.it, s.f.)

El diseño básico de la turbina, contempla que los álabes sean de geometría simétrica y que su ángulo de ataque sea cero, es decir, el ángulo que la cuerda del álabe (línea imaginaria que en la sección transversal, pasa por el borde de ataque y el borde de salida) forma con el brazo o sistema de sujeción a la estructura en la que esté montada. Esta disposición es igualmente eficaz, no importa en qué dirección sopla el viento.

Cuando el rotor gira, el aire avanza por el volumen que describe el rotor en funcionamiento, la corriente de aire se aproxima en una dirección específica que, se añade vectorialmente al viento, de modo que el flujo de aire resultante crea una variable pequeña positiva, en el ángulo de ataque del álabe. Esto genera una fuerza resultante que apunta hacia adelante a lo largo de una determinada línea 'de acción'. Esta fuerza se puede proyectar hacia el interior del eje de la turbina a una cierta distancia, dando un par positivo en el eje. A medida que el perfil aerodinámico se dirige a la parte posterior del rotor, el ángulo de ataque cambia de signo, la fuerza resultante generada coincide con la dirección de rotación. (Figura 17)

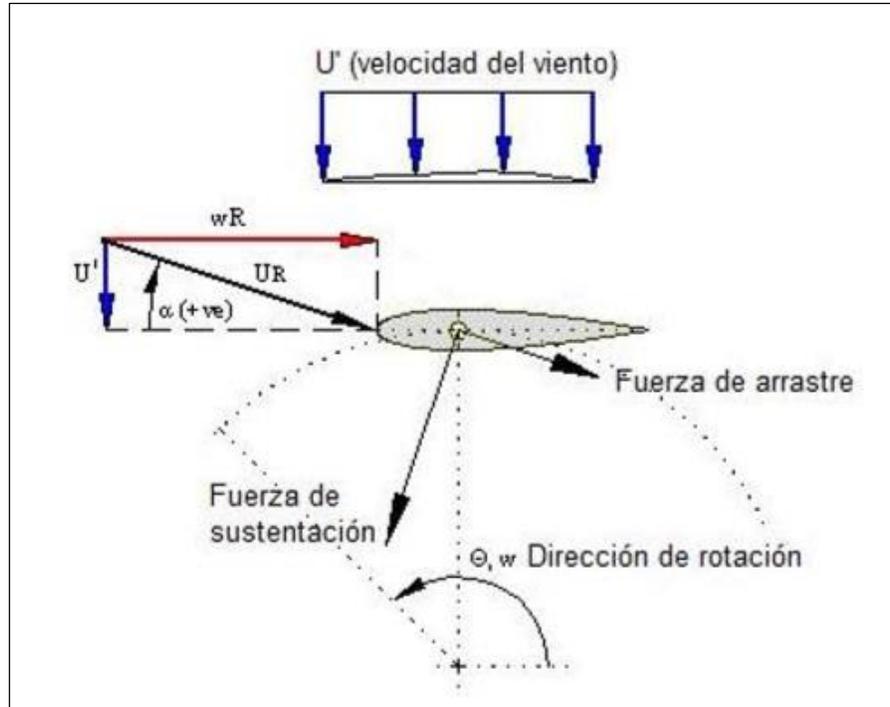


Figura 17. Fuerzas que se generan en un álabe que compone un rotor de álabe recto.

Fuente: (Ordúz y Suárez, 2011)

Es importante tener conocimiento de la fuerza tangencial experimentada por el álabe, y la fuerza radial que actúa perpendicular a la cuerda de éste.

Un aspecto de importancia del diseño es que el ángulo de ataque cambia cuando el rotor gira, de manera que cada álabe genera su par máximo en dos puntos de su ciclo (anverso y reverso de la turbina). Esto conduce a generar un ciclo de carga sinusoidal (pulso) que complica de cierta manera el diseño, además este tipo de rotor presenta modos de resonancia, donde, a una velocidad de rotación particular, las vibraciones pueden llegar a estar cerca de la frecuencia natural de los álabes, por tanto un diseño óptimo debería contemplar esta situación en el caso crítico.

Como la mayoría de la masa del mecanismo de rotación se encuentra en la periferia, se puede inferir que se generan fuerzas centrífugas de considerable magnitud sobre el mecanismo, que debe ser lo suficientemente resistente.

En la figura 18 se muestra una turbina de este tipo, de una escala que proporciona una potencia de generación en el orden de los MW.



Figura 18. Aerogenerador Darrieus de alabe recto o Tipo H.

Fuente: (Energialalvento.com, s.f.)

2.13.1 Funcionamiento del rotor de eje vertical de álabe recto. La figura 20 muestra el vector de velocidad que incide sobre los álabes en distintas posiciones angulares. La fuerza de elevación resultante siempre contribuye a la rotación del rotor, mientras que la fuerza de arrastre siempre se opone a la rotación. En la parte delantera, cerca de los 90° e igualmente, en los 270° , la componente

de elevación es mucho mayor que el componente de arrastre, de modo que se produce par positivo. El par total por revolución será positivo, si se seleccionan perfiles adecuados, que en la configuración básica son de sección simétrica. (Figura 19)

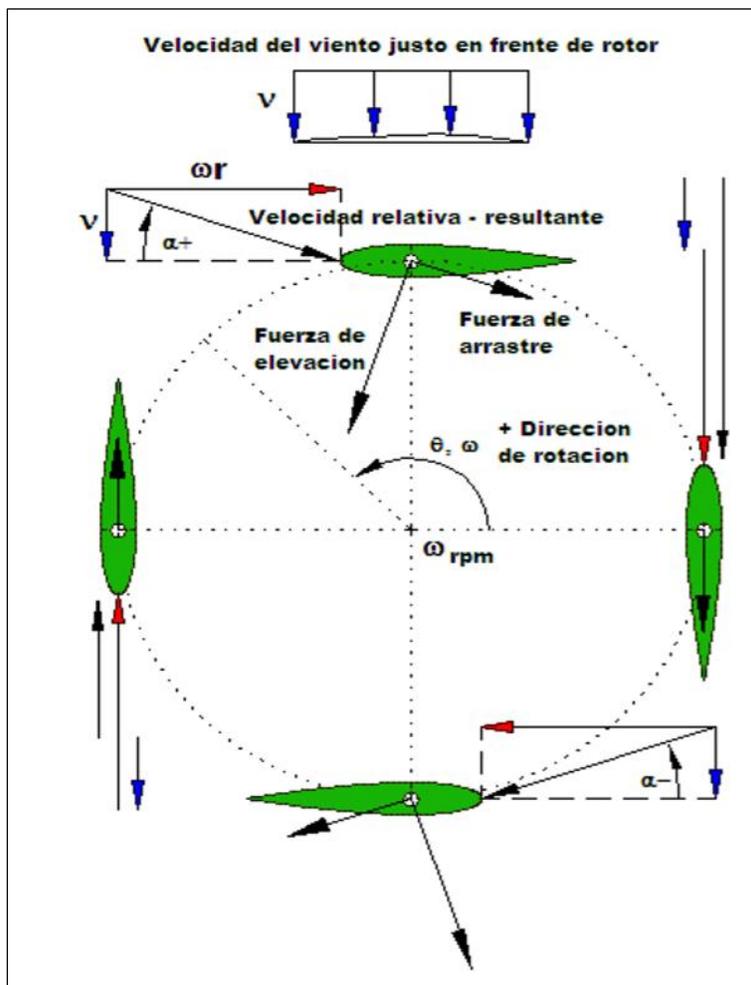


Figura 19. Esquema de funcionamiento del Darrieus.

Fuente: Modificada de windturbine-analysis.netfirms.com

2.14 Impresión 3d

¿Qué es la impresión 3D?

El proceso de impresión 3D, también llamado manufactura por adición (inglés), consiste en producir objetos a través de la adición de material en capas que corresponden a las sucesivas secciones transversales de un modelo 3D. Los plásticos y las aleaciones de metal son los materiales más usados para impresión 3D, pero se puede utilizar casi cualquier cosa, desde hormigón (inglés) hasta tejido vivo.

¿Para qué se usa la impresión 3D?

Crea de forma eficiente piezas únicas y geometrías verdaderamente complejas que solo son posibles con la impresión 3D.

En 1981, Hideo Kodama del Instituto Municipal de Investigaciones Industriales de Nagoya publicó su relato de un sistema funcional de creación rápida de prototipos que utiliza fotopolímeros (más sobre estos en un minuto). Se construyó un modelo sólido impreso en capas, cada una de las cuales correspondía a un corte transversal en el modelo. ¿Suena familiar?

Tres años más tarde, en 1984, Charles Hull hizo historia en la impresión 3D al inventando estereolitografía. La estereolitografía permite a los diseñadores crear modelos 3D utilizando datos digitales, que luego se pueden usar para crear un objeto tangible.

La clave para estereolitografía es un tipo de material de base acrílica conocido como fotopolímero. Golpee una tina de fotopolímero líquido con un rayo láser ultravioleta y la parte expuesta a la luz se convertirá instantáneamente en una pieza sólida de plástico, moldeada en la forma de su diseño de modelo 3D. No hace falta decir que esta nueva tecnología fue una gran noticia para los inventores, que ahora, teóricamente, podían hacer prototipos y probar sus diseños sin tener que hacer una gran inversión inicial en la fabricación.

En 1992, Bill Clinton tocó el saxo en *The Arsenio Hall Show*, y 3D Systems (la compañía de Charles Hull) creó el primer máquina de aparato estereolitográfico (SLA), lo que hizo posible

fabricar piezas complejas, capa por capa, en una fracción del tiempo que normalmente tomaría. Ese mismo año, la startup DTM produjo el primer máquina de sinterización selectiva por láser (SLS)— Que dispara un láser a un polvo en lugar de un líquido.

2011 – actualidad: impresión 3D en su mejor momento

Hoy, mirando hacia atrás en los últimos años, es difícil no sentir que los humanos vivimos en el futuro. Próximamente: jetpacks impresos en 3D!

Bueno, casi. Si bien el precio de las impresoras 3D ha caído rápidamente y la precisión de la impresión 3D ha mejorado, los innovadores están empujando los límites de formas con las que Charles Hull solo podía soñar. Los diseñadores ya no se limitan a imprimir con plástico. Caso en cuestión: ahora puede imprimir el anillo de compromiso de sus sueños usando oro o plata. Los ingenieros de la Universidad de Southampton han volado el primer avión no tripulado impreso en 3D del mundo y el prototipo KOR EcologicUrbee, un automóvil con una carrocería impresa en 3D que está construido para obtener 200 mpg en la autopista.

Más allá de las joyas y los aviones, la impresión 3D se utiliza ahora para fabricar productos asequibles. alojamiento para el mundo en desarrollo, y los visionarios han comenzado a emplear la tecnología para imprimir todo, desde brazos robóticos inteligentes, reemplazos óseos e incluso partículas solo unos pocos átomos de espesor (lo que podría resultar en componentes electrónicos y baterías aún más pequeños).

Eso lleva la impresión 3D al día de hoy, aunque para cuando se publique este artículo, seguramente habrá habido otros innumerables momentos notables en la historia de la impresión 3D en todo el mundo. Es casi imposible mantenerse al día. En el futuro, los niños construirán proyectos de arte con las impresoras 3D de sus aulas, y los dentistas podrán solicitar recetas para

juegos de dentaduras postizas impresas a medida. Mientras tanto, sigo viendo las noticias y esperando ese jetpack.

2.14.1 Tres hechos aleatorios, interesantes e inesperados sobre la impresión 3D. La NASA es un gran defensor de la impresión 3D, desde alimentos hasta la primera impresora 3D de gravedad cero en el espacio.

Hay una impresora 3D en el mercado (Photonic Professional GT) que puede crear objetos no más anchos que un cabello humano.

Louis DeRosa usó un 3Doodler, el bolígrafo de impresión 3D que se hizo famoso al ganar 2,3 millones de dólares en Kickstarter, para crear un dron funcional con estructura de hexacóptero .

(8)

2.15 Matlab

Matlab presenta un lenguaje de alto nivel el cual está basado en vectores, matrices y arrays, y se complementa con una extensa lista de toolbox que realizan funciones específicas para diferentes áreas de las ciencias y la ingeniería (Perez,2002).

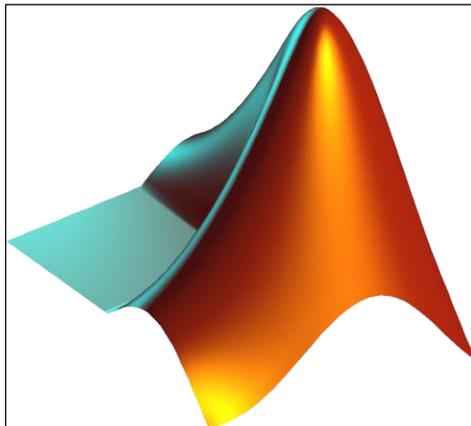


Figura 20. Logo de Matlab.

Fuente: www.mathworks.com

2.16 Solidworks

SolidWorks es un programa CAD (diseño asistido por computadora) de diseño mecánico en 3D que utiliza un entorno gráfico basado en Microsoft Windows, intuitivo y fácil de manejar. Su filosofía de trabajo permite plasmar sus ideas de forma rápida sin necesidad de realizar operaciones complejas y lentas.



Figura 21. Logo solidworks

Fuente: (Gomez, 2007)

Las principales características que hace de Solidworks una herramienta versátil y precisa es su capacidad de ser asociativo, variacional y paramétrico de forma bidireccional con todas sus aplicaciones. Además utiliza el gestor de diseño que facilita enormemente la modificación rápida de operaciones tridimensionales y de croquis de operación sin tener que rehacer los diseños ya plasmados en el resto de sus documentos asociados (Gomez, 2007).

¿Qué funcionalidades tiene Solidworks como software?

Antes de nada, hay que decir que Solidworks ofrece distintos paquetes, y en cada uno puedes encontrar una serie de funcionalidades. Diremos que existen 3 paquetes en este software: Standard, Professional y Premium. Al hablar de Solidworks, que es un programa escalable gracias a sus versiones diferentes, el profesional dispone de una herramienta muy completa.

Así, proporciona la posibilidad de modelado de piezas y ensamblajes. Un ejemplo puede ser la edición de la geometría directa, el diseño de piezas de distintos materiales, o bien la planificación de la estructura de los ensamblajes de los que hablamos.

Otra funcionalidad que encontramos en este software es la de hacer dibujos en 2D con los estándares, pudiendo hacer vistas automáticas, anotaciones o acotaciones. Igualmente, podrás reutilizar el diseño que ya hayas hecho, e incluso automatizarlo.

Solidworks también permite animar los modelos 3D para que se puedan apreciar mejor los matices del objeto en cuestión, así como la comprobación de las posibles interferencias que se puedan producir. (Gomez,2007)

2.17 Simulink

Simulink que es un complemento de Matlab es un entorno de diagramas de bloques extensible para la simulación de sistemas y el diseño basado en modelos. Permite a los ingenieros simular y analizar una amplia gama de sistemas que incluyen controles, señales y procesamiento de imágenes, comunicaciones y sistemas físicos multidominio (Arellano, julio 2013).

3. Diseño de la turbina Eólica

En este capítulo son descritos los modelos matemáticos e simplificaciones adoptadas para el diseño de la turbina eólica. El diseño de la turbina eólica se fundamenta en el análisis de datos meteorológicos obtenidos del IDEAM para la ciudad de Cúcuta.

3.1 Distribución Weibull

La distribución de Weibull es una distribución de probabilidad utilizada ampliamente para el análisis y modelamiento partiendo de datos medidos o asumidos en diferentes ámbitos profesionales como lo son la medicina, la ingeniería, economía y climatología. Su éxito se debe en gran medida a sus dos parámetros adaptables que pueden proporcionar una gran flexibilidad para ajustar la función de distribución a valores medidos con diferentes comportamientos (24)(25). Estos dos parámetros hacen referencia a la condición de probabilidad de un dato " c ", y el factor que hace referencia a la dispersión de la muestra " k ". La ecuación (1) presenta la función de distribución acumulada, donde k es un valor adimensional y c esta dado en m/s.

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1) \quad (3.1)$$

Derivando la ecuación (3.1) se obtiene la ecuación (3.2) la cual establece la función de probabilidad:

$$f(v) = \frac{dF(v)}{dv} = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2) \quad (3.2)$$

Donde v hace referencia a la velocidad del viento. Para la obtención de los parámetros k y c es necesario recurrir a métodos analíticos o computacionales, como puede ser una regresión (24). Del trabajo presentado por P. Bhattacharya (26) se concluye que el método de estimación de máxima verosimilitud presenta buenos resultados de estimación de probabilidad comparándolo con el método de mínimos cuadrados.

Para trabajar con la función de verosimilitud se debe establecer primero un rango de valores aleatorios (muestra) x_1, x_2, \dots, x_n tomados de una función de probabilidad $f(x, \theta)$ donde θ es un parámetro desconocido. La función de probabilidad de esta muestra aleatoria es la densidad conjunta de los n valores aleatorios y es función del parámetro desconocido, obteniendo la ecuación (3.3).

$$L = \prod_{i=1}^n f_{xi}(x_i, \theta) \quad (3)$$

La ecuación 3 se conoce como la función de verosimilitud. Para encontrar la estimación de máxima verosimilitud es necesario encontrar el valor del parámetro desconocido θ que hace tender a L a un valor máximo, lo que es igual a derivar la ecuación (3.4) respecto al parámetro desconocido:

$$\frac{\partial \log L}{\partial \theta} = 0 \quad (4)$$

Ahora tomando la función de probabilidad presentada en la ecuación (3.2) y aplicando el método de máxima verosimilitud, con k y c como los parámetros desconocidos, se obtiene la ecuación (3.5).

$$L(x_1, x_2, \dots, k, c) = \prod_{i=1}^n \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (3.5)$$

Dado que se tienen dos parámetros desconocidos es necesario derivar la ecuación (3.5) con respecto a c y al parámetro k respectivamente. El resultado de este proceso es presentado en la ecuación (3.6) y la ecuación (3.7).

$$\frac{\partial \log L}{\partial c} = -\frac{n}{c} + \frac{1}{c^2} \sum_{i=1}^n x_i^k = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial \log L}{\partial k} = \frac{n}{k} + \sum_{i=1}^n \ln(x_i) - \frac{1}{c} \sum_{i=1}^n x_i^k \cdot \ln(x_i) = 0 \quad (3.7)$$

Realizando despeje del parámetro c en la ecuación (3.6) y reemplazando en la ecuación (3.7), se obtiene la expresión presentada en la ecuación (3.8):

$$\frac{\sum_{i=1}^n x_i^k \cdot \ln(x_i)}{\sum_{i=1}^n x_i^k} - \frac{1}{k} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) = 0 \quad (3.8)$$

Para solucionar la ecuación (3.8) es necesario recurrir a métodos numéricos, en este caso se seleccionó el método de la secante dado que proporciona el valor de las raíces de la ecuación en pocas interacciones y su implementación computacional es sencillo. Para aplicar el método de la secante se inicia con dos valores aleatorios de la variable desconocida x_n y x_{n-1} para poder obtener por medio de la función, evaluada en estos dos puntos, una estimación del parámetro x_{n+1} .

$$x_{n+1} = x_n - \frac{x_n - x_{n-1}}{f(x_n) - f(x_{n-1})} f(x_n) \quad (9)$$

La función $f(x_n)$ es presentada en la ecuación (3.10) y el parámetro desconocido x_n es k .

$$f(x_n) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^k \cdot \ln(x_i)}{\sum_{i=1}^n x_i^k} - \frac{1}{k} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \quad (10)$$

Después de obtenido el parámetro k se reemplaza en la ecuación (6) para obtener el valor del parámetro c .

Del procedimiento anterior se obtiene que el parámetro k es de y el parámetro c es de. La distribución de probabilidad de los datos de viento obtenidos por la estación meteorológica del aeropuerto Camilo Daza entre el periodo de 2011 a 2021 es presentada en la figura 22. Donde se puede observar que la velocidad de 2m/s es la que presenta mayor probabilidad en la ciudad de Cúcuta.

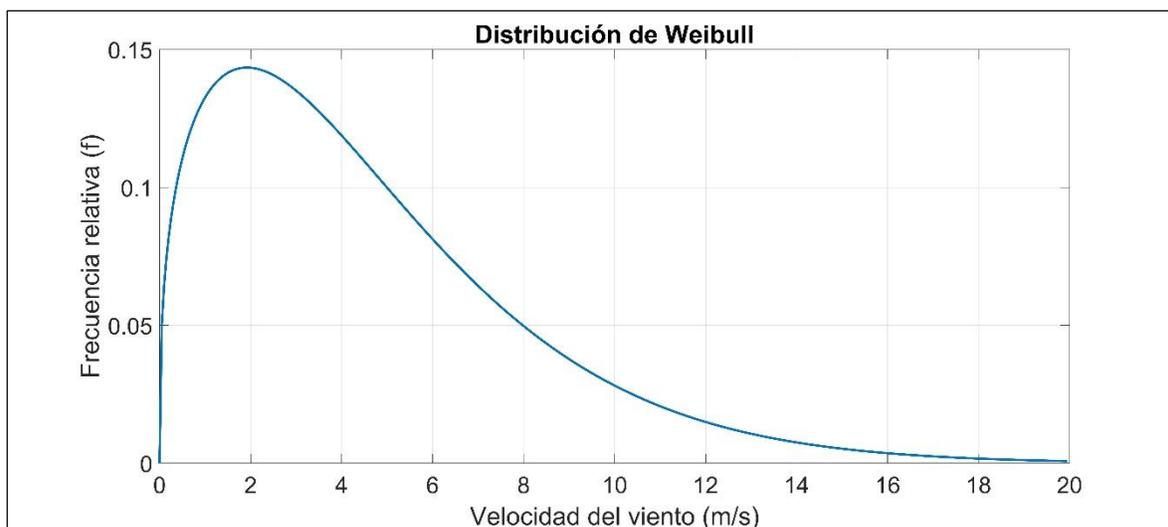


Figura 22. Distribución de Weibull de vientos en la ciudad de Cúcuta.

3.2 Rosa de los vientos

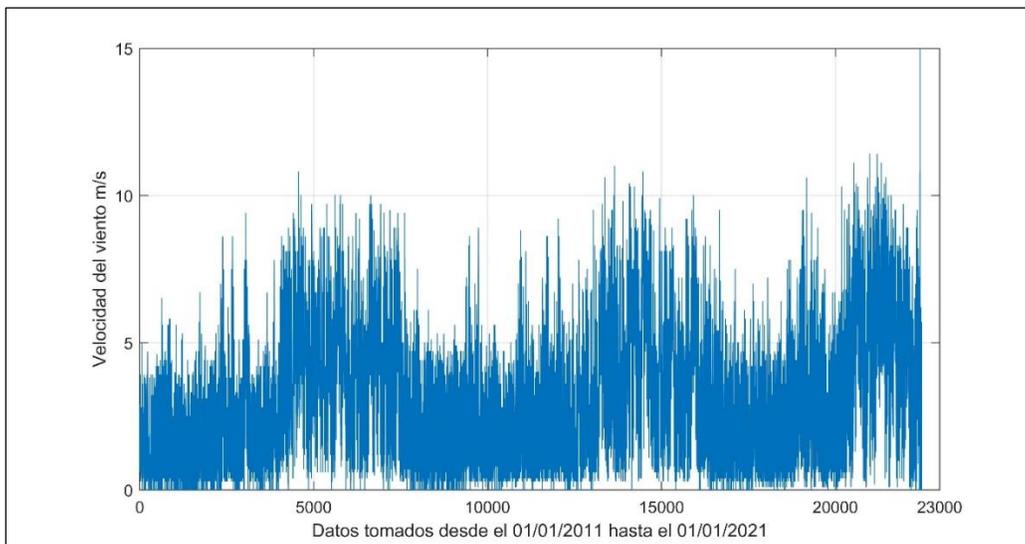


Figura 23. Datos de velocidad del viento de la ciudad de Cúcuta entre los intervalos de 01/01/2011 y 01/01/2021.

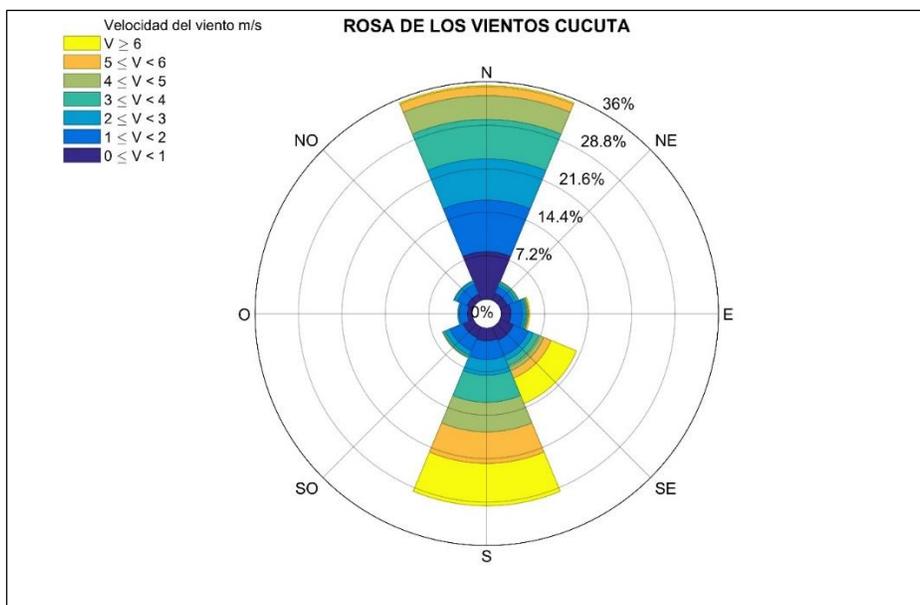


Figura 24. Rosa de los vientos Cúcuta.

3.3 Diseño del prototipo

El diseño del prototipo experimental de la turbina eólica de eje vertical este compuesto de dos fases, en la primera se realizará un diseño basado en el trabajo presentado por (Orduz y Suarez, 2011) realizando un diseño básico del prototipo basado en la información de viento obtenida en el inciso anterior. Posteriormente se seleccionarán optimizadores para mejorar el rendimiento preliminar.

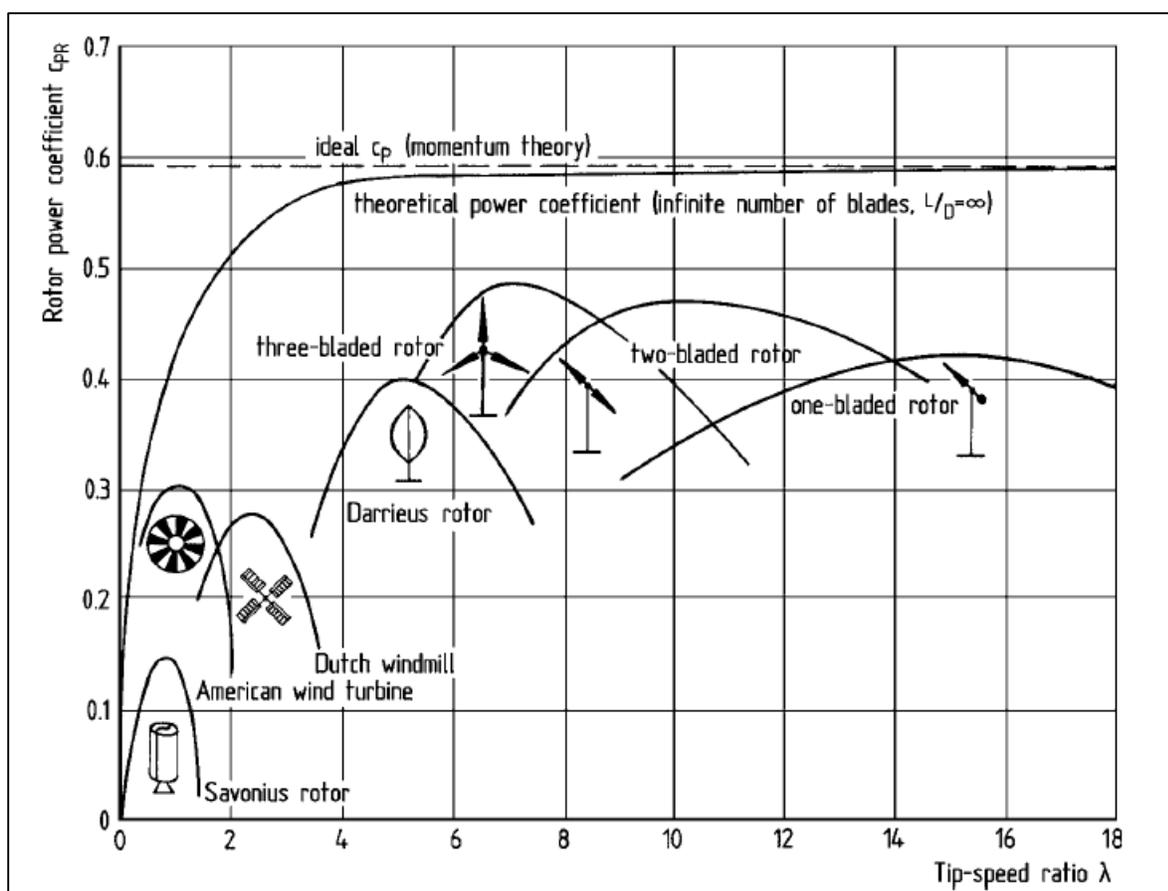


Figura 25. Coeficiente de potencia para diferentes diseños de rotores eólicos

Fuente: (Haug, 2006)

Del análisis realizado posterior se puede concluir que en la ciudad de Cúcuta no se presentan vientos de altas velocidades, por lo cual no es posible realizar un diseño de turbina de tipo horizontal. En la figura 25 se pueden visualizar los coeficientes de potencia de los rotores de turbinas con respecto al TSR. Para bajas velocidades se obtendrá un TSR bajo por lo cual el diseño de turbina eólica mas conveniente debe ser una que trabaje con fuerzas de arrastre como lo hace el rotor Savonius.

El tipo de turbina elegida es un rotor tipo Lenz con modificación de los perfiles aerodinámicos de los alabes para conseguir un mejor aprovechamiento por fuerzas de arrastre. Para el diseño de la turbina eólica se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones de diseño (Orduz, 2011);

1. Las palas de la turbina deben fabricarse con materiales económicos y resistentes que permitan un optimo desempeño del sistema ante variaciones o vibraciones presentadas por la aleatoriedad del viento.
2. Evitar el uso de transmisiones mecánicas entre el rotor y el generador con el fin de no generar perdidas mecánicas.
3. El diseño del prototipo esta enfocado en ser robusto y practico para permitir su fácil transporte, mantenimiento y emplazamiento para la realización de pruebas.

3.3.1 Calculo de velocidad del viento. Para iniciar el proceso de diseño se parte de la velocidad media presentada en la ciudad de Cúcuta, esta es la que presenta una mayor probabilidad y la cual es determinada en la figura 1, como puede observarse la velocidad promedio es de 2.2 m/seg.

3.3.2 Calculo de la potencia generada. Para el dimensionamiento del rotor eólico es necesario estimar la potencia que estará destinada a generar, para este trabajo se opto por elegir una potencia

de salida neta de 1 vatio, esta será la potencia entregada finalmente por la turbina eólica. Como se pudo observar en la figura 4 las turbinas eólicas no son capaces de transformar la totalidad de la energía del viento en energía mecánica, el límite máximo de transformación viene dado por el límite de Betz el cual es de 59%.

Diferentes estudios se han demostrado que el coeficiente de potencia de una turbina tipo Lenz puede variar de 0.1 a un valor de 0.4 [29][30][31][32], para el diseño presente trabajo y teniendo en cuenta los resultados de las investigaciones consultadas se tomara como referencia un coeficiente de potencia de 0.35, Por tanto el cálculo de la potencia neta de la turbina estará dada por la ecuación 3.11:

$$P_n = \frac{P_u}{c_p} = \frac{1}{0.35} = 2.8 \text{ Wtt} \quad (3.11)$$

El resultado anterior nos da a entender que para generar 1Watt de energía útil, es necesario diseñar una turbina eólica que capte 2.8Watt proveniente de la energía del viento.

3.3.3 Dimensionamiento primario del prototipo. En el siguiente apartado se calculan las dimensiones físicas del prototipo partiendo de la velocidad del viento la potencia útil necesaria. La ecuación 2 presenta la energía útil obtenida del viento, donde P es la potencia nominal generada por el rotor, ρ es la densidad del viento, A es el área de barrido del rotor y v_m es la velocidad promedio del viento.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_m^3 \quad (3.12)$$

Despejando la Eq (3.12) y reemplazando la potencia nominal calculada en la Eq (3.11) y la velocidad promedio de la ciudad de Cúcuta, se obtiene la Eq (3.13) necesaria para hallar el área de barrido de la turbina eólica. Para la densidad del aire se tomo el valor 1200 kg/m^3 , este valor es tomado de la información presentada por el IDEAM en su página online.

$$A = \frac{P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^3} = \frac{2,8}{0,5 \cdot 1,200 \cdot 2,2^3} = 0.43 \text{ m}^2 \quad (3.13)$$

El área de barrido calculado en la ecuación (3.13) representa el área que forma la turbina eólica en movimiento y la cual es interceptada por un plano perpendicular. Esta área puede entenderse como el área que representa una sección rectangular como se puede observar en la Ec(3.14)

$$A = D \cdot h \quad \text{Ec(4)} \quad (3.14)$$

Donde D es el diámetro total del rotor y h es la longitud total del alabe.

La relación D/h se determinará en los posteriores ítems después de determinar los parámetros de diseño de la turbina eólica.

3.3.4 Determinación de solidez. La solidez de una turbina eólica se define como el coeficiente entre el área del alabe y el área de barrido. La solidez puede incrementarse incrementando el número de alabes o incrementando la longitud de la cuerda del alabe, esto puede observarse en la figura 26. (Palanisamy, et al. 2019)

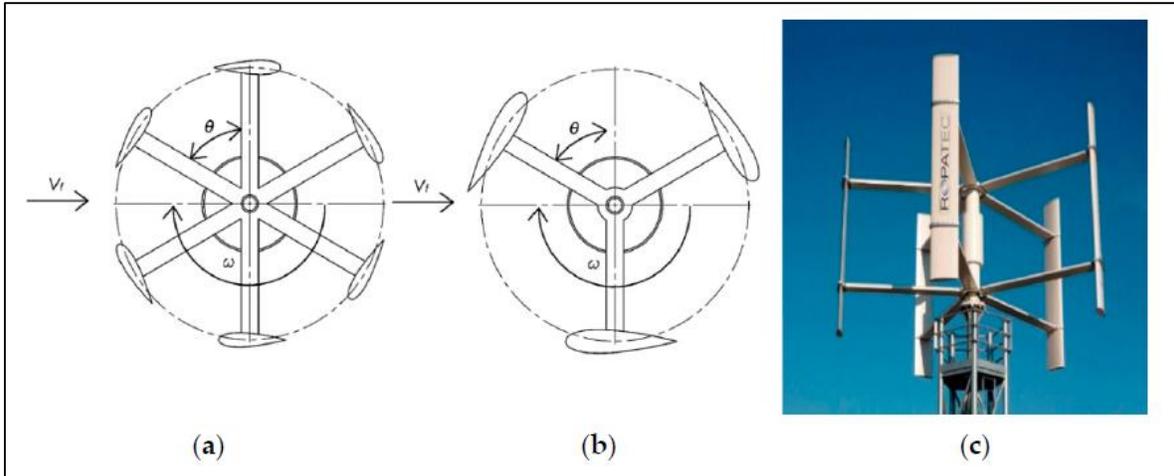


Figura 26. a) Incremento en el número de alabes. b) Incremento de la longitud de cuerda. c) Turbina eólica vertical con alta solidez.

Fuente: (Mohamed, 2013)

La solidez, el coeficiente de potencia y el TSR están estrechamente relacionados. En las investigaciones presentadas por (Palanisamy, et al, 2019) (Mohamed.) (El-Samanoudy, et. al.2010) se observa que un aumento de la solidez permite obtener un mejor torque de arranque Figura (27) mientras que el punto de máxima eficiencia ocurre a bajos TSR lo cual es ideal para una turbina que funcione con bajas velocidades de viento. (Worasinchai, et. al. 2015) Determino que los valores óptimos para una turbina de eje vertical esta en el rango de 0.25 a 0.4, y que además para bajas velocidades de viento se recomienda utilizar de 4 a 5 alabes para aumentar la solidez.

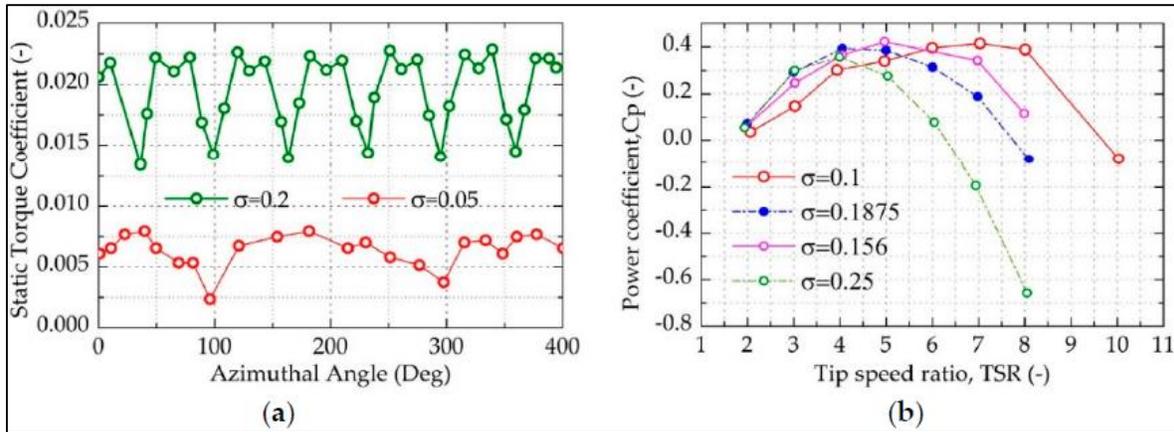


Figura 27. a) Efecto de la solidez para el torque de arranque. b) Efecto de la solidez en el coeficiente de potencia C_p .

Para el presente proyecto se eligió una solidez de 0.4, este valor se escogió basado en los resultados publicados en la literatura consultada.

3.3.5 Relación de aspecto de alabe. La relación de aspecto de alabe (BAR) establece la relación entre la longitud del alabe y la cuerda de este mismo Ecuación 3.15, a mayores valores de BAR los efectos de flujo tridimensional sobre cada sección del perfil aerodinámico tienden a despreciarse [27]. La figura 28 muestra el efecto del BAR con respecto al coeficiente de potencia C_p . Para el diseño del prototipo se eligió un valor BAR de 12.

$$BAR = \frac{L}{c} = 12 \quad (3.15)$$

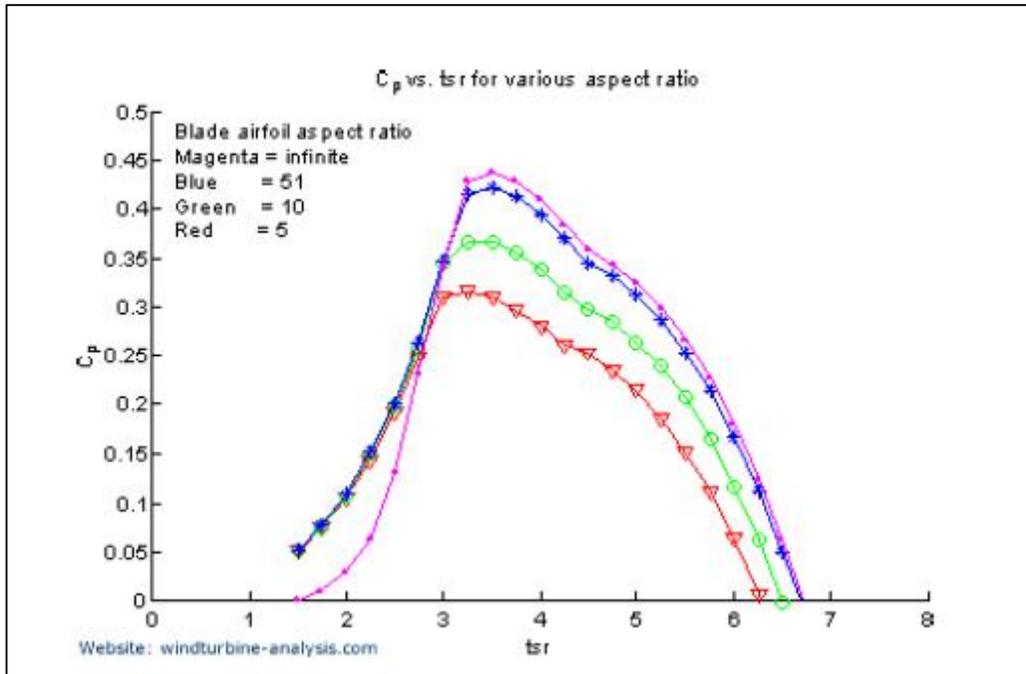


Figura 28. TSR vs C_p para varios valores de relación de aspecto de alabe.

3.3.6 Cálculo de la cuerda y diámetro del rotor. Como se expuso en la sección 1.4 la solidez se define como el coeficiente entre el área del alabe y el área de barrido, esta relación se puede representar por medio de la ecuación 3.16. Donde N es el número de alabes, c es la cuerda del alabe, L la longitud del alabe, A es el área de barrido y D es el diámetro del rotor.

$$\sigma = \frac{N \cdot c \cdot L}{A} = \frac{N \cdot c}{D} \quad (3.16)$$

El diseño propuesto constara de un total de 4 alabes y una solidez de 0.4, según la información recolectada de la literatura estos son valores óptimos para una turbina que trabajara con bajas velocidades de viento, como es el caso de la ciudad de Cúcuta.

Despejando la ecuación 3.15 y reemplazando en la ecuación 3.16 se puede obtener la ecuación 3.17, la cual es la solidez en función del BAR y el área de barrido.

$$\sigma = \frac{N \cdot c^2 \cdot BAR}{A} \quad (3.17)$$

Despejando la ecuación 3.17 se puede obtener el valor de la cuerda mediante la ecuación 8, y reemplazando los valores conocidos.

$$c = \sqrt{\frac{A \cdot \sigma}{N \cdot BAR}} = \sqrt{\frac{0,43 \cdot 0,4}{4 \cdot 12}} = 0,059 \text{ m} \approx 0,06 \text{ m} \quad (3.18)$$

Obtenido el valor de la cuerda se puede despejar la ecuación 3.16 y reemplazar en la consecuente ecuación 3.19 para obtener el diámetro del rotor.

$$D = \frac{N \cdot c}{\sigma} = \frac{4 \cdot 0,06}{0,4} = 0,6 \text{ m} \quad (3.19)$$

Con el diámetro del rotor se procede a despejar la ecuación 4 y reemplazar en la consecuente ecuación 3.20 para obtener la altura del rotor:

$$h = \frac{A}{D} = \frac{0,43}{0,6} = 0,71 \text{ m} \quad (3.20)$$

3.3.7 Optimizador 1: Perfil aerodinámico. Para el primero optimizador se elige el perfil aerodinámico de la aleta, para esta selección se considero los resultados presentados por [29], donde se estudiaron 4 tipos de rotores de arrastre diferencial y en el cual se concluyo que el rotor tipo Lenz presentaba el mejor rendimiento a bajos TSR. Para el diseño de este perfil se tuvieron en consideración las ecuaciones presentadas por (Windstuff,2005).

En la figura 29 se puede observar el perfil de la aleta, las ecuaciones 3.21 y 3.22 establecen las relaciones presentadas por [12] para un óptimo desempeño del perfil tipo Lenz. El Angulo de

ataque del perfil se estableció en 9 grados ya que los resultados obtenidos por [29] establecieron que este es el Angulo óptimo para obtener el mejor desempeño del perfil elegido.

$$\text{longitud cuerda} = \text{circunferencia rotor} * 0.09 = 0,054 \text{ m} \quad (3.21)$$

$$\text{Diametro aleta} = \text{Diametro rotor} * 0.14 = 0,085 \text{ m} \quad (3.22)$$

3.3.8 Optimizador 2: Perfiles helicoidales. El segundo optimizador establecido para obtener un mejor desempeño del rotor eólico es el de perfiles de la pala helicoidales. Se han establecido y demostrado en diferentes trabajos como los de [36] y [31] que los perfiles helicoidales mejoran el rendimiento en el arranque y mejoran el torque del rotor. Aunque muchos estudios han llegado a la misma conclusión no se ha podido establecer un valor optimo del ángulo de inclinación de la pala, este valor se ha encontrado que en la literatura varia de un valor de 15° hasta un valor máximo de 43.7° [37][38]. Para el presente estudio se estableció un ángulo experimental de 20° . En la figura 29 se observa el diseño esquemático de las palas del rotor eólico.

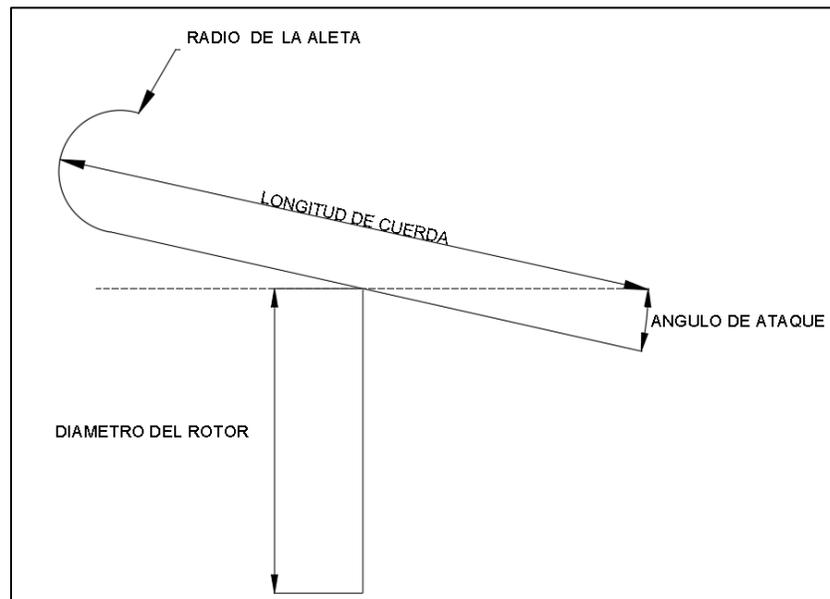


Figura 29 .Perfil tipo Lenz para el rotor eólico.

3.3.9 Modelamiento en 3D de Turbina a través de Software CAD. En esta sección se explica el modelamiento en 3d a través del software SOLIDWORKS, el cual es un programa CAD (diseño asistido por computadora) de diseño mecánico en 3D que utiliza un entorno gráfico basado en Microsoft Windows, intuitivo y fácil de manejar. Este programa nos permitirá modelar la turbina eólica y al mismo tiempo generar los archivos en formato STL (siglas provenientes del inglés "STereoLithography"1) es un formato de archivo informático de diseño asistido por computadora, que se usará para su posterior impresión, el cual será explicado en el próximo capítulo.

Una vez diseñado el tamaño de la turbina de la sección 3.7, procedemos a introducir los datos de la tabla 1 más relevantes del diseño, para tener en cuenta a la hora del modelado en Solidworks como se observa en la figura 30.

Tabla 1. Características de diseño de la turbina.

CARACTERISTICA	VALOR	UNIDAD
Velocidad del viento	2.2	m/s
Diámetro del rotor	0.6	m
Longitud de la cuerda	0.054	m
Diámetro de la aleta	0.085	m
Angulo de ataque del perfil	9	° (grados)
Altura del rotor	0.71	m
potencia neta	2.8	w
Angulo de inclinación de los alabes	20	° (grados)

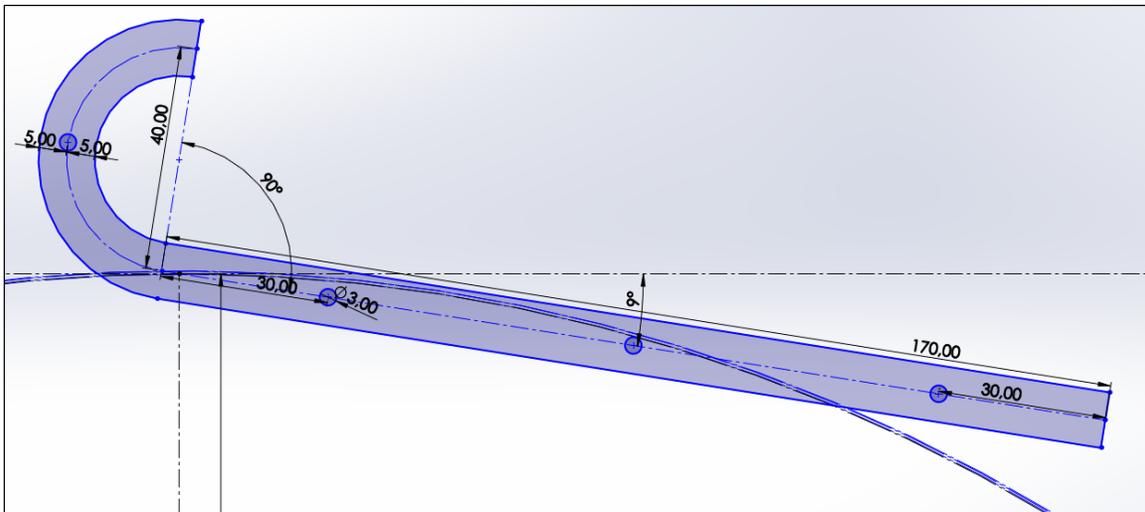


Figura 30. Perfil optimizador implementado en la pala del rotor (medidas en milímetros).

Para poder modelar la hélice helicoidal en Solidworks fue necesario utilizar la herramienta hélice, esta herramienta requiere de tres datos para poder ejecutarse: el ángulo de inclinación, la altura de la hélice y las revoluciones. Los dos primeros datos son conocidos, para hallar las revoluciones basta simplemente con determinar la relación de la hélice con respecto a la longitud total horizontal del rotor asumiéndose como un cilindro sólido. Primero se descompone el cilindro en un rectángulo y dos círculos como puede verse en la figura 31.

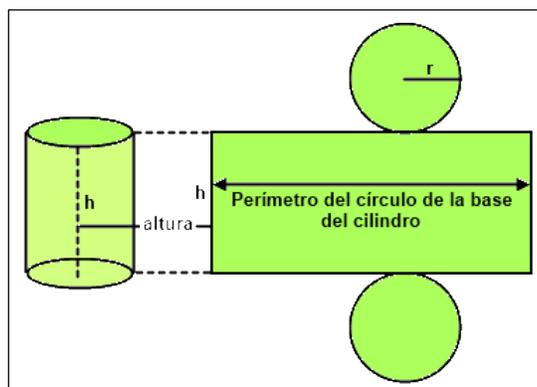


Figura 31. Descomposición de cilindro

Con esta relación se plasman los tres datos mencionados anteriormente, como se muestra en la siguiente figura 32.

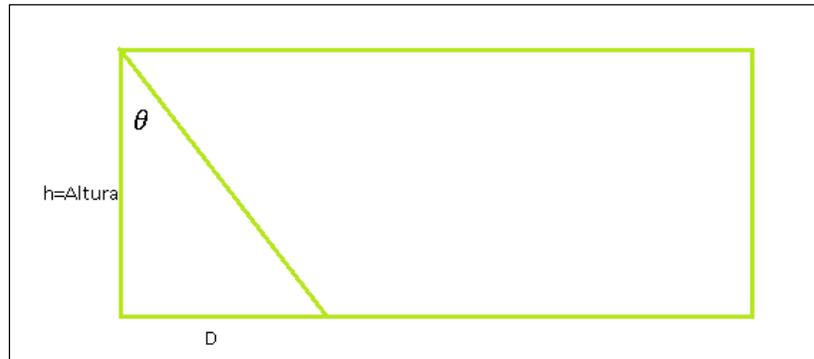


Figura 32. Descripción geométrica de la ley tangente.

Para calcular el valor D se hace uso de trigonometría, específicamente la ley tangente:

$$\tan(\theta) = \frac{D}{h} \quad (3.23)$$

Despejando D se obtiene

$$D = h * \tan(\theta) \quad (3.24)$$

Finalmente, el dato de revoluciones puede hallarse mediante la ecuación siguiente:

$$\text{Revolucion} = \frac{D}{\text{perimetro del circulo de la base}} = \frac{D}{2\pi r} \quad (3.25)$$

Obteniendo el resultado que podemos ver en la figura 33.

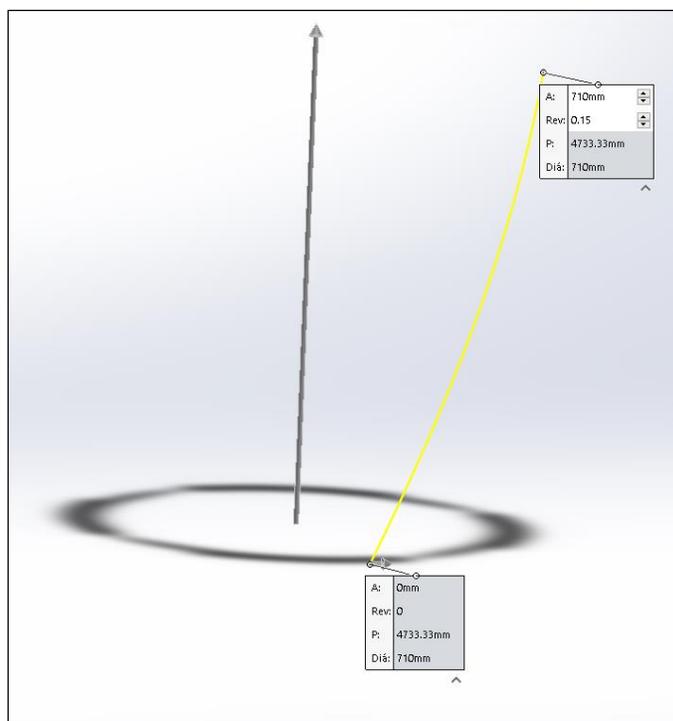


Figura 33. Guía Helice/esprial implementada en el modelo en solidworks.

Una vez creado el croquis con los datos del diseño se procedió a generar volumen de a través de la herramienta barrido del programa y así obtener el modelo 3d de la figura 34.

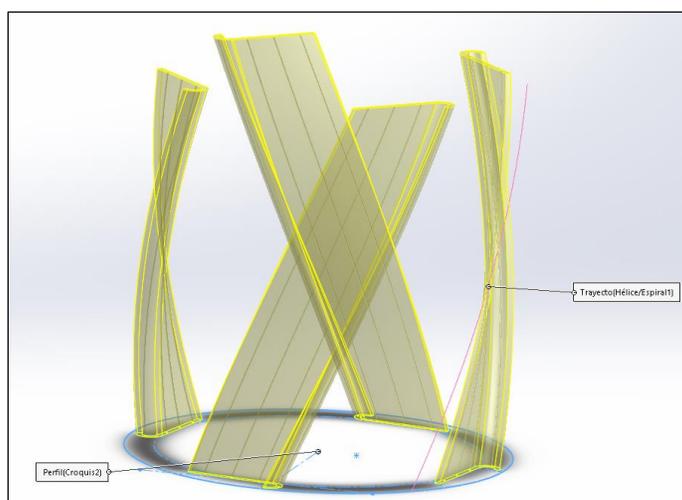


Figura 34. Resultado de barrido extrusión en solidworks.

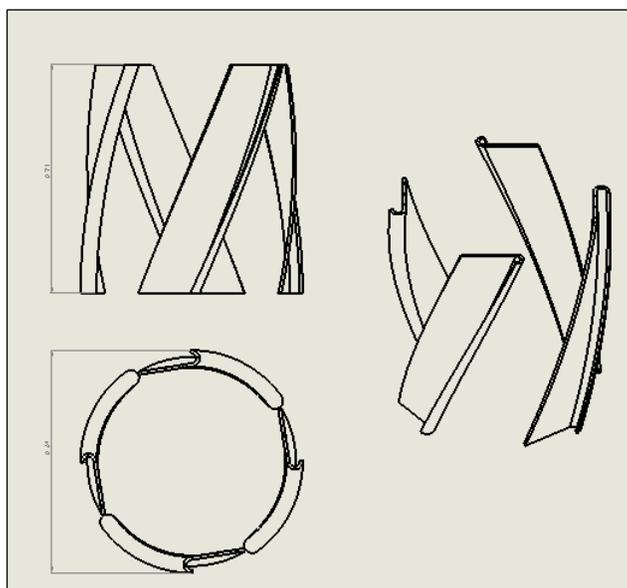


Figura 35. Vista detalle de las palas (cotas en mm).

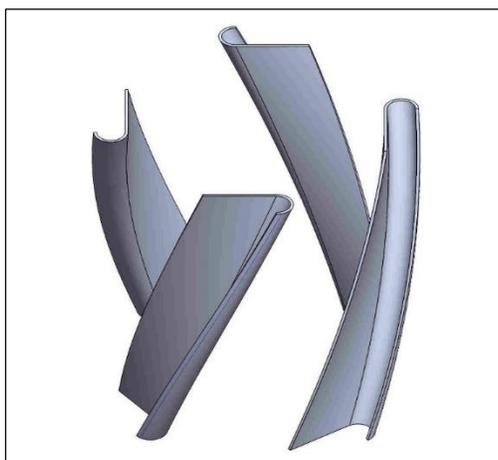


Figura 36. Vista isométrica de las palas del rotor eólico.

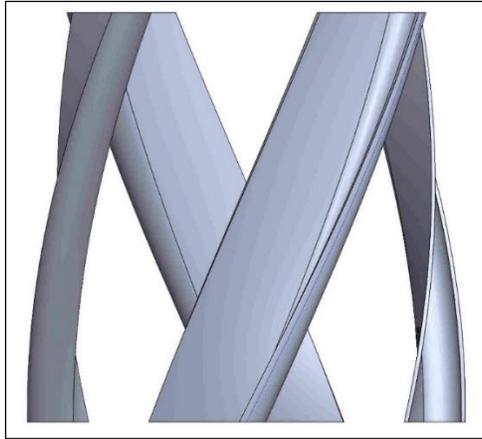


Figura 37. Vista de perfil de las palas del rotor eólico.



Figura 38. Vista de alzado de las palas del rotor eólico.

Para el rotor se desarrolló un modelo que permitió ensamblar las palas al rotor y al mismo tiempo soportar el eje para su fácil rodamiento. Obteniendo finalmente el modelo 3d como se observa en la figura 39. En la figura 40 se puede observar la vista isométrica, la vista lateral y la vista de planta.

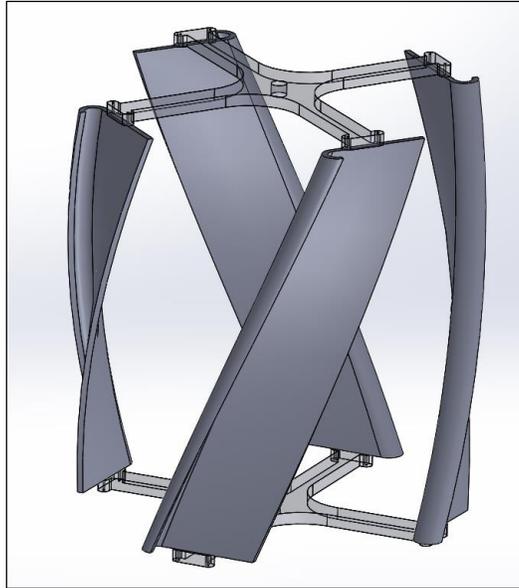


Figura 39. Modelo 3d implementado en solidworks.

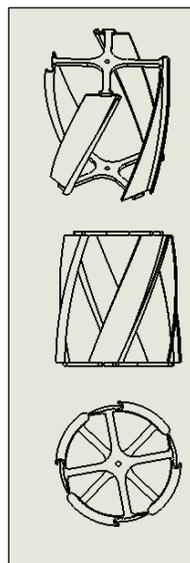


Figura 40. Vista isométrica, vista lateral y planta del modelo 3d implementado.

4. Construcción del prototipo en impresión 3D

4.1 Introducción

El objetivo de esta sección es presentar la construcción del prototipo de la turbina eólica con la ayuda del modelado 3d en solidworks, finalmente se explica el proceso constructivo físico para desarrollar el prototipo.

4.2 Palas del rotor eólico

Basados en el diseño realizado en la sección anterior, se procede a la impresión 3d. En este proyecto se utilizó la impresora 3d prusa tairona (figura 41) de cama de dimensiones de área de impresión de 20x20 el cual es controlada a través de una tarjeta de microprocesadores llamada Arduino. La impresora 3D funciona como manufactura aditiva, la cual permite construir estructuras en 3D capa sobre capa.

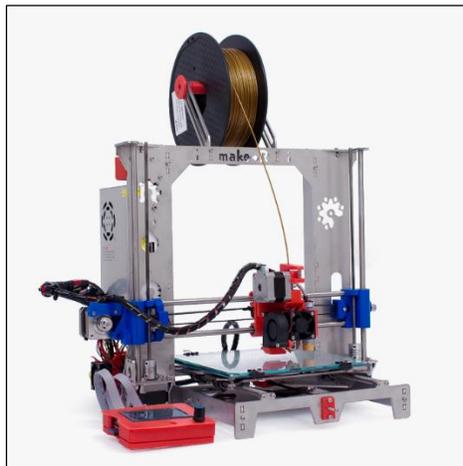


Figura 41. Impresión 3d prusa tairona

La impresora 3d funciona con filamento de 1.75mm de acrilonitrilo butadieno estireno o ABS (por sus siglas en inglés Acrylonitrile Butadiene Styrene) es un plástico muy resistente al impacto (golpes) muy utilizado en automoción y otros usos tanto industriales como domésticos. Es un

termoplástico amorfo. Es un material que presenta alta resistencia mecánica, al impacto y un amplio rango de temperaturas de uso, generalmente desde -20° hasta los 80° . Debido a las características en fundido este material es fácilmente imprimible en impresoras 3d convencionales. La temperatura de impresión del ABS es de $210-260^{\circ}$.

Una vez desarrollado el prototipo de las palas en solidworks, se realiza el despiece para iniciar con la impresión. Este procedimiento fue necesario debido a que el tamaño de las palas es mayor que el tamaño de la cama de la impresora, por lo que fue necesario desarrollar la impresión en escala 1:2 por motivos de escalabilidad un. A continuación, observamos el resultado del despiece en la figura 42.



Figura 42. Fotografía de las palas impresas.

Finalmente se obtuvo el resultado que vemos en la 42, el cual se puede observar cuatro palas, cada una formada por 7 piezas unidas. Este procedimiento fue necesario para poder desarrollar el prototipo proyectado en este trabajo.

4.3 Rotor

En esta sección es importante resaltar el método en el cual se plantea sostener físicamente las palas y las cuales deberán rotar concéntricamente a un eje, para así finalmente ser implementada como una turbina eólica de eje vertical.

Este modelo implementado en el rotor permite la reducción de material a la hora de fabricación y permite obtener una turbina más ligera, lo cual es fundamental a la hora de vencer la inercia en el arranque.

El modelo del rotor obtenido se observa en la siguiente imagen.



Figura 43. Modelo del rotor implementado

4.4 Ensamble

Una vez impresas todas las piezas de la turbina, se realizó el ensamble a través de elementos mecánicos como: 1 eje roscado de 100cm de 3/16", 4 arandelas 3/16" y 8 tuercas de seguridad de 3/16". Con el fin de asegurar mecánicamente las palas del rotor al eje, y garantizar el centro del prototipo en el eje del rotor. Y para facilitar la rotación de la turbina en el eje roscado, se instalaron dos (2) rodamientos de 12,3mm.

Continuación se observan los elementos necesarios para ensamblar la turbina eólica.



Figura 44. Elementos mecánicos usados para ensamblar el rotor.

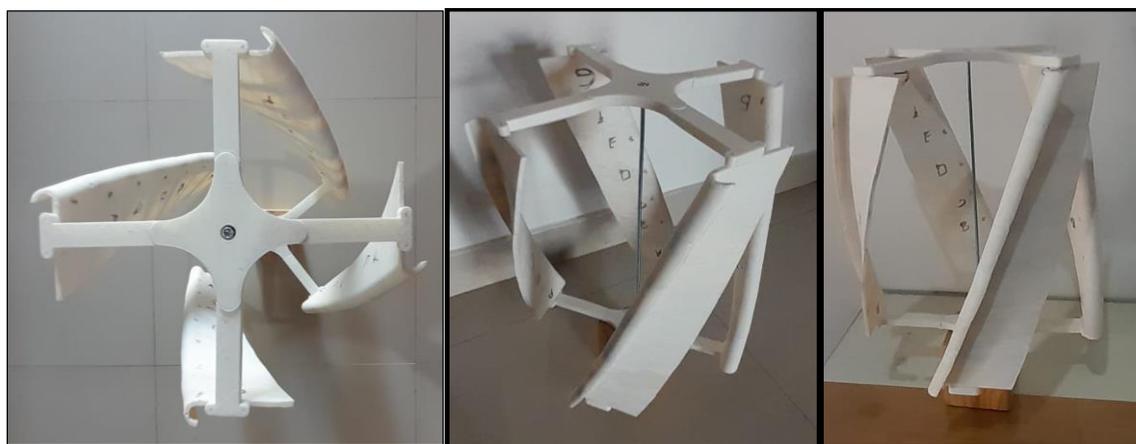


Figura 45. Prototipo final implementado.

5. Conclusiones

Del Proyecto se concluye que el dimensionamiento de turbinas para la ciudad de Cúcuta debe estar enfocado en un diseño que funcione con fuerza de arrastre, en vez de sustentación, debido a las bajas velocidades del viento en la ciudad.

El optimizador de perfil helicoidal con pala tipo J, la cual es una modificación de la pala Lenz, ayuda significativamente al arranque de la turbina bajo condiciones de muy baja velocidad del viento.

De los resultados de los análisis de los datos de viento obtenida por el IDEAM y la estación meteorológica del aeropuerto Camilo Daza y el dimensionamiento de la turbina en el presente trabajo, podemos concluir que Cúcuta no es una ciudad con un alto potencial eólico, por lo cual no es viable utilizar esta tecnología para suplir grandes cantidades de energía.

La turbina eólica diseñada en el presente trabajo puede suplir pequeñas cantidades de energía, como lo pueden ser cargadores de baterías de celular o portátiles, también para cargar sistemas de almacenamiento de energía de pequeños sistemas de iluminación led.

Se espera que la elaboración de este modelo y la construcción de este prototipo abran puertas en investigación de la UFPS en el área del diseño mecánico, mostrando alternativas y posibilidades de mejoramientos de las turbinas eólicas.

Es importante resaltar que los objetivos propuestos en este trabajo fueron alcanzados de manera satisfactoria y que hay un gran número de obras que se pueden llevar a cabo con la turbina eólica, especialmente en aplicaciones industriales, para el aprovechamiento del recurso eólico.

6. Recomendaciones

Recomendaciones generales de estudio

Se espera q el trabajo aquí presentado tenga las condiciones de servir como punto de partida para el desenvolvimiento de nuevos trabajos en que los siguientes ítems, entre otros pudieren ser abordados.

Análisis de viabilidad económica para la implementación de turbinas eólicas en la ciudad de Cúcuta.

Para el desarrollo de futuros trabajos que, relacionados con esta temática, que busquen la optimización del comportamiento aerodinámico del rotor, es imprescindible la utilización de herramientas informáticas avanzadas como la dinámica de fluidos computacional, ya que pueden brindar una visión más clara del fenómeno y evaluarlo con mayor exactitud.

Realización de estudios sobre el aprovechamiento de recurso eólico de la ciudad de Cúcuta en diferentes sitios de la ciudad.

Realización de estudios de generadores eléctricos óptimos para este tipo de turbinas.

Medición de revoluciones por minuto en el eje de la turbina

Utilizar materiales rígidos para la manufactura para este tipo de turbinas

Instalar generador eléctrico el eje de la turbina y medir la potencia de salida a diferentes velocidades de viento a través de simuladores de viento.

Recomendaciones de trabajos futuros

Desenvolver un nuevo estudio de data de vientos, en donde se logre encontrar el lugar óptimo para la implementación de turbinas eólicas en la ciudad de Cúcuta.

Adaptar generador de energía para cuantificar la producción de potencia útil

Análisis de esfuerzos de corte de la turbina con diferentes materiales de construcción

7. Referencias Bibliográficas

Atlas del país vasco. 1993. Blog. Recuperado de <https://serviciosdedocumentacion.wordpress.com/atlas-pais-vasco/>

Archiexpo.it (s.f.). Sin información. recuperado de <https://pdf.archiexpo.it/>

Arellano Aaturima Miguel, (julio 2013), Matlab & Simulink para ingeniería nivel I, 1, 7-1.

Colombia.bioweb.co. (s.f.). Sin información. Recuperado de <https://colombia.bioweb.co/>

Danish Wind Industry Association. (s.f.). Sin información. recuperado de <http://www.windpower.org>.

Ega-asociacioneolicagalicia.es (s.f.). Sin información. Recuperado de <https://www.ega-asociacioneolicagalicia.es/>

Energiadalvento.com (s.f.). Sin información. recuperado de <http://www.energiadalvento.com/aboutus.php?domain=energiadalvento.com>

Erich Hau. Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Applications, Economics. Springer. 2 edition, 2006.

Esdesing. (2022). ¿Qué es Solidworks y para qué sirve? Conoce sus funciones Recuperado de: <https://www.esdesignbarcelona.com/actualidad/disenio-producto/solidworks-que-es-funcionalidades>

El-Samanoudy, M; Ghorab, A; Youssef, S.Z; Effect of some design parameters on the performance of Giromill vertical axis wind turbine. Ain shams Eng J. 2010, 1, 85-95.

Fernández P. (s.f.). “Energía Eólica”. Departamento de Ingeniería eléctrica y energética. Universidad de Cantabria. España Gomez González Sergio, (2007), El gran libro de Solidworks, Marcombo, 1.

- Hernández Durango, Andrés Felipe (2021) Diseño y fabricación de un prototipo de microaerogenerador de baja potencia.. Universitat Politècnica de Catalunya.
- J. Pulfer, W. Meza, F. Mitjans. (2017) Estudio de la eficiencia energética de cuatro diseños de rotores eólicos a eje vertical y de arrastre diferencial. IX Simposio internacional sobre calidad de la energía eléctrica.
- M Mohamed. Impacts of solidity and hybrid system in small wind turbines performance. Energy, 2013. 57, 495-504.
- Mendoza N. A. (2017). Diseño De Un Generador Eólico De Eje Vertical Tipo Darrieus Helicoidal De 3 Kw. (Tesis de grado). Tecnológico Nacional de Mexico. Ciudad de Mexico, Mexico.
- Mendoza Cerón, Nuria Nelly (2017) Diseño de un generador eólico de eje vertical tipo Darrieus helicoidal de 3kwtt. Tecnológico Nacional de Mexico. Tesis de pregrado.
- Orduz O. y Suarez J. (2011). Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia. (Tesis de grado). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- Oscar Iván Orduz Verdugo, Julian Edgardo Suarez Perez.(2011) Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación de baja potencia.
- Palanisamy Mohan Kumar, Krishnamoorthi Sivalingam, Teik-Cheng Lim, Seeram Ramakrishna, He Wei.(2019) Strategies for Enhancing the Low Wind Speed Performance of H-Darrieus Wind Turbine—Part 1. Clean Technologies, Doi:10.3390/cleantechnol1010013, 2019.
- Paritosh Bhattacharya, Rakhi Bhattacharjee. Study on Weibull distribution for estimating the parameters. Journal of applied quantitative methods. Vol 5. No2. 2010.

Pérez César, (2002), Matlab y sus aplicaciones en las ciencias y la ingeniería, Prentice Hall.

Pinilla A. (1997). (Manual) Manual de aplicación de la Energía Eólica. Recuperado de http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/energias_alternativas/material_difusion/manualE%F3licaweb.pdf

Purser, P.E. Spearman, M. L. (1951) Wind tunnel tests at low speed of swept and yawed wings having various plan forms. NASA, Washington, DC, USA.

Salamanca Forero, Sergio Steven (2020) Caracterización de la variabilidad del recurso eólico. Universidad de la Salle. Bogotá. 2020. Tesis de pregrado.

Solarpedia.es (s.f.). Sin información. recuperado de <http://solarpedia.es/>

Shiono, M. Suzuki, K. Kiho, S. (2002) Output characteristics of Darrieus Water turbine with helical blades for tidal current generations. In proceedings of the twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference,, Kitakyushu, Japan, 26-41 May 2002.

UPME/IDEAM (2006). Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales & Unidad de Planeación Minero Energética (2006). Atlas del viento y la energía eólica de Colombia. Repositorio.

Vásquez M. (2007). “Diseño de una turbina eólica de eje vertical con rotor mixto”. Tesis de grado. Universidad Austral de Chile, ciudad de Valdivia-Chile.

www.windside.com/products.html (s.f.). Sin información. recuperado de www.windside.com/products.html

[Windturbine-analysis.netfirms.com](http://windturbine-analysis.netfirms.com) Sin información. recuperado de <http://windturbine-analysis.netfirms.com/>

Worasinchai; S. Ingram, L. G; Dominy, R. G; The physics of H-Darrieus Turbine Starting Behavior. *J. Eng Gas Turbines Power*, 2015, 138,

World Wind Energy, Inicial. (año). monografía. Recuperado de https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/84/Wind_2006andprediction_en.png Windstuff now. “Lenz turbine”. Diseñado por E Lenz, 2005, originalmente disponible en www.windstuffnow.com.

Zhou W, Yang H, Fang Z. Wind power potential and characteristic analysis of the pearl river delta region, China. *Renewable energy*, 31(6):739-753.