

DISEÑO DE UN AEROGENERADOR PORTÁTIL DE EJE VERTICAL

MARCELA MOLINA CEREZO

SARA ECHEVERRY JARAMILLO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA AERONÁUTICA

MEDELLÍN

2013

DISEÑO DE UN AEROGENERADOR PORTÁTIL DE EJE VERTICAL

MARCELA MOLINA CEREZO

SARA ECHEVERRY JARAMILLO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Aeronáutico

Director

CÉSAR NIETO LONDOÑO

I.M. Ph.D.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA AERONÁUTICA

MEDELLÍN

2013

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Juliana Andrea Niño Navia

Firma del jurado

Jorge Iván García Sepúlveda

Medellín, 21 de junio de 2013

DEDICATORIA

A mi madre por brindarme todo su amor.

A mi abuela por su apoyo de corazón.

A mi padre por guiarme por el camino ideal.

Y a mis amigos por su compañía incondicional.

Sara Echeverry Jaramillo

A mi papá, a mi mamá y a mi hermana que son el centro de mi vida y mi mayor motivación, a toda mi familia y a mis amigos por brindarme su compañía en todos los momentos. Gracias por estar siempre en mi vida y apoyarme.

Marcela Molina Cerezo

AGRADECIMIENTOS

Las estudiantes que participaron en la elaboración de este texto, desean expresar sus más sinceros agradecimientos a:

César Nieto Londoño, I.M., PhD, director de tesis, por su apoyo y confianza, además de su valiosa orientación y entrega durante la elaboración de este trabajo de grado, como proyecto perteneciente al grupo de investigación en Ingeniería Aeroespacial. Recordamos especialmente la frase: “lo feo no sirve, lo barato sale caro y la mejor solución es la más sencilla” con la que nos animó a continuar cada vez que surgía algún inconveniente con el prototipo a construir.

A Juan Guillermo García, I.A, asesor de este proyecto, por su contribución y paciencia para orientar en el manejo de una herramienta de análisis computacional como lo es Ansys Fluent y su apoyo constante en el desarrollo del proyecto.

A Andrés Felipe Tabares, I.A, por sus valiosos aportes durante las simulaciones, además de brindarnos sugerencias en el momento de la fabricación y modificación de los prototipos.

A todas las personas que nos ayudaron desinteresadamente, compartiendo sus conocimientos acerca de temas relacionados con este trabajo, y al CIDI por la participación directa patrocinando económicamente el desarrollo del prototipo.

CONTENIDO

GLOSARIO	13
RESUMEN.....	16
INTRODUCCIÓN.....	18
OBJETIVOS	20
Objetivo general	20
Objetivos específicos.....	20
1. MARCO TEÓRICO	21
1.1 Generalidades del recurso eólico.....	21
1.2 Recurso eólico en Colombia	23
1.3 La energía del viento.....	27
1.4 Potencia del viento.....	28
1.5 Distribución de Weibull.....	29
1.6 Ley de Betz.....	29
1.7 Densidad de potencia	30
1.8 Curva de potencia.....	31
1.9 Coeficiente de Potencia	32
1.10 Análisis estructural	33
Fuerza del viento en el rotor	33
Velocidad específica óptima de diseño.....	34
Vibración	34
2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE	36
2.1 Concepto de aerogenerador	36
2.2 Tornillo de Arquímedes	38
2.3 Concepto de ala inflable.....	40
2.4 Aerogeneradores portátiles existentes en el mercado.....	41

3.	SELECCIÓN DE MATERIALES	43
3.1	Material principal.....	43
3.2	Material estructural	45
4.	SELECCIÓN DEL GENERADOR ELÉCTRICO.....	48
5.	DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA.....	53
6.	ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	59
7.	ANÁLISIS DE DISEÑO	64
7.1	Rotor Savonius	65
7.2	Rotor Savonius-Darrieus.....	66
7.3	Comparación	68
8.	VALIDACIÓN DE DISEÑO	70
8.1	Rotor Savonius	71
8.2	Rotor Savonius-Darrieus.....	73
8.3	Comparación	77
9.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL DISEÑO EN EL MERCADO	78
	CONCLUSIONES	81
	RECOMENDACIONES.....	83
	BIBLIOGRAFÍA.....	85
	ANEXOS.....	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Brisa de mar y de tierra.....	21
Figura 2. Brisa de valle y montaña.....	22
Figura 3. Obstáculos del viento.....	23
Figura 4. Número de horas que en promedio durante un día de cada año se puede observar el sol en el cielo	24
Figura 5. Promedio anual de energía de radiación solar que incide por metro cuadrado en Colombia	24
Figura 6. Promedio anual de velocidad del viento en superficie (10m de altura) sobre el territorio colombiano	25
Figura 7. Variabilidad diurna del viento a lo largo del año para la estación meteorológica Galerazamba-Bolívar.....	26
Figura 8. Variabilidad diurna del viento a lo largo del año para la estación meteorológica Urrao-Antioquia	27
Figura 9. Potencial eólico respecto a la velocidad del viento.....	29
Figura 10. Desviación del viento	30
Figura 11. Densidad de potencia	31
Figura 12. Curva de potencia de un aerogenerador de 600 KW	32
Figura 13. Coeficiente de potencia.....	32
Figura 14. Aerogenerador de eje horizontal (HAWT)	36
Figura 15. Aerogenerador de eje vertical (VAWT).....	37
Figura 16. Tornillo de Arquímedes	38
Figura 17. Hélice de Hooke (1683)	39
Figura 18. Inflatoplano de Goodyear (1957).....	40
Figura 19. UAV inflable de ILC DOVER (1970).....	40
Figura 20. Esquema estructural de la tela Ripstop.....	44
Figura 21. Resistencia y módulo específico de la fibra de vidrio y carbono.....	46

Figura 22. Varillas de fibra de vidrio.....	47
Figura 23. Dinamo SON Delux.....	50
Figura 24. Consumo de energía de dinamos con luz apagada y encendida	51
Figura 25. Sistema de carga E-Werk	52
Figura 26. Contorno de presiones perfil NACA 0018 original y modificado	53
Figura 27. Distribución de presiones en el arreglo de perfiles modificados	55
Figura 28. Cp vs Time.....	56
Figura 29. Grafica del TSR Vs. Cp, para diferentes aerogeneradores.	56
Figura 30. Aerogenerador Savonius-Darrieus.....	57
Figura 31. Aerogenerador tipo Savonius.....	58
Figura 32. Estructura idealizada y diagrama de fuerzas.....	59
Figura 33. Diagrama de fuerza sobre el eje	60
Figura 34. Relación de poleas	62
Figura 35. Cometa decorativa en forma de tornillo sinfín	65
Figura 36. Cp vs Tiempo (rotor Savonius).....	66
Figura 37. Cp vs Tiempo (rotor Savonius-Darrieus).....	67
Figura 38. Montaje y equipos utilizados	70
Figura 39. Prototipo de aerogenerador tipo Savonius de radio 30 cm.....	71
Figura 40. Velocidad del viento vs Velocidad de rotación	72
Figura 41. Velocidad del viento vs Potencia entregada.....	72
Figura 42. Velocidad del viento vs Coeficiente de potencia	73
Figura 43. Prototipo de aerogenerador tipo Savonius-Darrieus.....	74
Figura 44. Prototipo de aerogenerador tipo Savonius de radio 40 cm.....	75
Figura 45. Velocidad del viento vs Velocidad de rotación	76
Figura 46. Velocidad del viento vs Potencia entregada.....	76
Figura 47. Velocidad del viento vs Coeficiente de potencia	77
Figura 48. Aerogenerador Greenerator.....	78
Figura 49. Aerogenerador Wellsee 400w.....	79

Figura 50. Propuesta para nueva estructura	83
--	----

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Escala de velocidades de viento	28
Tabla 2. Comparación de materiales	43
Tabla 3. Especificaciones técnicas de la Rip-stop.....	44
Tabla 4. Propiedades de la fibra de vidrio y de carbono.....	45
Tabla 5. Tabla de selección para el generador eléctrico	48
Tabla 6. Especificaciones técnicas del generador Schmidt SON Delux	49
Tabla 7. Comparación de resultados entre el perfil NACA 0018 original y modificado	54
Tabla 8. Comparación de Torque a diferentes velocidades.....	68

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A, ARTÍCULO: DISEÑO DE UN AEROGENERADOR PORTÁTIL DE EJE VERTICAL

ANEXO B, ENTREGA DE CFD: ANÁLISIS MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL DEL PERFIL NACA 0018 ABIERTO EN EL BORDE DE ATAQUE

ANEXO C, ENTREGA DE CFD: ANÁLISIS MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL DE 3 PERFILES NACA 0018 ABIERTOS EN EL BORDE DE ATAQUE UBICADOS A 120°

ANEXO D, INFORME DE AVANCE DEL CIDI

ANEXO E, PLANOS DE PROTOTIPO CONSTRUIDO

GLOSARIO

AEROGENERADOR: generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento, los hay de eje vertical (VAWT) y de eje horizontal (HAWT).

ALA INFLABLE: ala que está formada por superficies de membranas superior e inferior, una sección transversal aerodinámica, y una forma en planta rectangular (similar a un paracaídas regular).

ÁNGULO DE ATAQUE: ángulo que forman la cuerda geométrica de un perfil aerodinámico con la dirección del aire incidente.

BORDE DE ATAQUE (*LEADING EDGE*): parte delantera del perfil alar, donde la corriente se bifurca hacia el intradós y extradós.

BORDE DE FUGA (*TRAILING EDGE*): punto en el que las corrientes de aire provenientes del intradós y extradós confluyen y abandonan el perfil.

L/D *RATIO* (*Cl/Cd*): una aeronave (o perfil) tiene una relación L/D alta si produce alta sustentación o bajo arrastre.

COEFICIENTE DE ARRASTRE (*Cd*): cantidad adimensional, indica el arrastre o resistencia de un objeto a fluir en un ambiente como aire.

COEFICIENTE DE POTENCIA (*Cp*): cantidad adimensional, indica el porcentaje de potencia disponible para la turbina.

COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN (*Cl*): cantidad adimensional, relaciona la sustentación generada por un cuerpo, la presión dinámica del fluido a su alrededor y un área de referencia asociada al cuerpo.

CUERDA GEOMÉTRICA: distancia entre el borde de ataque y borde de fuga de un perfil aerodinámico.

DARRIEUS: VAWT que está formado por un conjunto de álabes, unidos entre sí, que pueden girar alrededor de un eje vertical y cuya sección transversal tiene forma de un perfil aerodinámico.

DENSIDAD: magnitud escalar, cantidad de masa contenida en un determinado volumen de una sustancia.

DINAMO: generador eléctrico destinado a la transformación de flujo magnético en electricidad mediante el fenómeno de la inducción electromagnética, generando una corriente continua.

DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR (CAD – *Computer Aided Design*): uso de herramientas computacionales que asisten a ingenieros, arquitectos y a otros profesionales del diseño en sus respectivas actividades.

ELONGACIÓN: alargamiento que sufre un cuerpo que se somete a esfuerzo de tracción.

ENVERGADURA: ancho de una aeronave de un extremo a otro de las alas.

EXTRADÓS: corresponde a la parte exterior del perfil aerodinámico.

FUERZA DE CORIOLIS: desvío de la trayectoria del aire resultante del movimiento de rotación de la tierra. La magnitud de la desviación está relacionada con la velocidad a la cual se mueve el aire y la latitud en la que se localiza.

HAWT: (*Horizontal Axis Wind Turbine*), aerogenerador de eje horizontal.

INERCIA: propiedad que tienen los cuerpos de permanecer en su estado de reposo o movimiento, mientras no se aplique sobre ellos alguna fuerza.

INFLATOPLANO: avión experimental inflable diseñado por la empresa estadounidense Goodyear.

INTRADÓS: corresponde a la parte inferior del perfil aerodinámico.

MECÁNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD - *Computational Fluid Dynamics*): rama de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de sustancias. Se utilizan computadores para la simulación de interacciones entre líquidos y gases con superficies.

MÓDULO DE YOUNG: parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza.

NÚMERO DE REYNOLDS: número adimensional utilizado en mecánica de fluidos, diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido. Relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo.

PERFIL AERODINÁMICO: forma del área transversal de un ala, que al desplazarse es capaz de crear a su alrededor una distribución de presiones que genera sustentación.

RESISTENCIA A LA TENSIÓN: esfuerzo tensional por unidad de área a la que el material falla (se rompe).

SAVONIUS: VAWT que se basa en la diferencia de la fuerza aerodinámica que ejerce un flujo de aire sobre objetos de distinta forma.

TIP SPEED RATIO (TSR): relación entre la velocidad tangencial en la punta del perfil y la velocidad del viento.

TORNILLO DE ARQUÍMEDES: fue inventado hace más de 2000 años y se utilizaba principalmente para elevar el agua.

TORQUE: tendencia de una fuerza a hacer rotar un objeto sobre un eje.

TRAMA: conjunto de hilos paralelos en un tejido, transversales a la urdimbre.

URDIMBRE: conjunto de hilos longitudinales que se mantienen en tensión en un marco o telar, para diferenciarlo del hilo insertado sobre y bajo los hilos de la urdimbre (trama).

VAWT: (*Vertical Axis Wind Turbine*), aerogenerador de eje vertical.

VIENTO ZONDA: se produce por el ascenso de aire húmedo desde el Océano Pacífico a barlovento de la Cordillera de Los Andes y por el descenso de una masa de aire pre-frontal que se fue calentando al descender.

RESUMEN

Los desastres naturales o accidentes de gran tamaño provocados por la humanidad vienen acompañados por una precariedad o falta total de suministro de electricidad, entre otros servicios básicos. Esto tiene efectos sobre las personas afectadas y el personal de rescate que llega a estos lugares a prestar sus servicios, en cuanto a necesidades básicas, como dificultades de comunicación e iluminación. El tener acceso a sistemas de información básicos, mediante la conexión de radios de banda corta, permiten prevenir fatalidades adicionales asociadas a replicas de los factores que pudieron dar lugar al desastre.

Este trabajo tiene como propósito diseñar un aerogenerador de eje vertical, de baja velocidad y baja potencia, que tenga presentes criterios de portabilidad, facilidad de ensamble y transporte, brindando la posibilidad de suministro eléctrico para equipos básicos de comunicación, iluminación en campamentos transitorios o actividades recreativas (acampar).

Se indican las características y generalidades del viento, el potencial y capacidad del recurso eólico en Colombia, se muestran mapas indicando las variaciones del viento en algunos lugares del territorio nacional para ubicar dónde pueda ser implementado el aerogenerador.

Adicionalmente se estudian los diferentes tipos de aerogeneradores, con el fin de escoger la configuración adecuada para este proyecto. Finalmente se realizan análisis computacionales de diferentes diseños y se evalúan sus ventajas y desventajas frente a diseños existentes en el mercado.

Se definen conceptos como Tornillo de Arquímedes y Ala inflable, y su principio de funcionamiento, los cuales están involucrados en las posibilidades de diseño final del aerogenerador.

También se hace la selección de materiales y del generador eléctrico a implementarse en el prototipo, teniendo en cuenta los criterios de selección: bajo peso, portabilidad, estructuras deformables, facilidad de ensamble y transporte.

PALABRAS CLAVE:

Aerogenerador de eje vertical (Savonius y Darrieus), Ala inflable, Tornillo de Arquímedes.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el país vive situaciones ambientales que afectan drásticamente las condiciones de vida de las personas. Cuando ocurre una temporada invernal y hay familias que necesitan ser trasladadas a campamentos transitorios, se debe tener una manera de suplir las condiciones básicas para que ellos puedan pasar por lo menos una noche en estos lugares.

Entre otras, se necesitan soluciones portátiles para el suministro de energía, que les permita asegurar el abastecimiento de electricidad para luminarias en la noche o cargar instrumentos de comunicación básica, tanto a las familias afectadas, como al personal que presta los servicios de rescate.

Debido a que cuando ocurre una catástrofe, accidente o desastre natural las fuentes de energía convencionales no están disponibles de forma inmediata, es por esto que se debe buscar la manera de suplir esta situación mediante fuentes alternativas de energía.

Además, como podría ser una solución a emplearse por los rescatistas que acudan a estos sitios, debe ser de bajo peso, fácil transporte e instalación, que no entorpezca su desplazamiento y las operaciones de rescate.

El propósito final del diseño es que sea usado para suplir necesidades básicas de energía eléctrica en estos lugares. Actualmente en el mercado, se encuentran aerogeneradores que podrían suplir estas necesidades, sin embargo, tienen desventajas como facilidad de adquisición (importación y costo, alto peso y además, normalmente son de eje horizontal, necesitando condiciones de viento direccionado para su funcionamiento.

Para el diseño del aerogenerador portátil, se conoce que los de eje vertical presentan condiciones de operación más favorables para este tipo de aplicaciones, cuando se comparan con los aerogeneradores de eje horizontal, dado que estos últimos requieren condiciones de dirección constante de viento y emplazamiento a grandes alturas para su operación correcta.

Adicionalmente, los aerogeneradores de eje vertical son más fáciles de disponer y pueden aprovechar las condiciones más precarias de viento del lugar (intensidades de viento de 3 m/s en adelante). Esta particularidad también favorece la instalación de los generadores, ya que simplemente se pueden ubicar al nivel del suelo, además, que se facilitan las operaciones de mantenimiento.

En este proyecto se pretende realizar el diseño de un aerogenerador de baja potencia y velocidad (vientos entre ligero y fresco), de eje vertical y de uso portátil, que se desarrollará tomando como base estructuras aerodinámicas y procesos de manufactura usuales en el diseño y concepto de ala inflable; utilizando materiales como tela y fibras, con el fin de reducir peso y aumentar la eficiencia del aerogenerador mediante la combinación de fuerzas de arrastre y sustentación.

OBJETIVOS

Objetivo general

Diseñar un aerogenerador de eje vertical, portátil, de baja velocidad, que tenga presente criterios de portabilidad, facilidad de ensamble y transporte, para suministro eléctrico de equipos básicos de comunicación e iluminación en campamentos transitorios o actividades recreativas.

Objetivos específicos

- Realizar una búsqueda bibliográfica que permita establecer los elementos necesarios para el diseño y fabricación de un aerogenerador portátil.
- Seleccionar los materiales de las aspas y la estructura del aerogenerador portátil a partir de los elementos identificados.
- Diseñar y dimensionar una configuración para las aspas y la estructura del aerogenerador portátil, teniendo presentes los requerimientos de facilidad de ensamble y transporte.
- Evaluar la posibilidad de realizar un diseño final basado en el tornillo de Arquímedes o combinarlo con el concepto de ala inflable, mediante análisis computacional de cada modelo, para luego seleccionar el que mejor se adapte a las condiciones de diseño que se tienen.
- Seleccionar el generador eléctrico más apropiado para la operación bajo condiciones de velocidad de giro variable, teniendo presentes los requerimientos de transporte, demanda de carga y variación de velocidad del viento.
- Fabricar un prototipo que opere a bajas velocidades de viento y realizar pruebas de campo para validar los parámetros de diseño y operación.
- Analizar la competitividad del producto final con respecto a productos existentes actualmente en el mercado, comparando características como precio, ventajas - desventajas del diseño y peso.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Generalidades del recurso eólico

La energía eólica es la energía cinética del aire, que se genera debido a que en la tierra se presenta un calentamiento disparado con la energía proveniente del sol; puesto que parte de esta energía se concentra sobre los continentes y otra sobre las masas de agua. Durante el día el aire que se encuentra sobre mares y lagos permanece frío, debido a que la radiación del sol se consume en la evaporación o es absorbida por la masa de agua. Sobre los continentes, en cambio, la tierra absorbe poca cantidad de energía, y la evaporación del agua es menor, entonces el aire se calienta, se expande y se vuelve liviano, y finalmente sube a las capas altas de la atmósfera (10 Km). El aire pesado (que se encuentra sobre las aguas) entra al continente a reemplazar el aire liviano. De esta forma se crean las corrientes de aire cerca de las costas y las orillas de los lagos.

Figura 1. Brisa de mar y de tierra

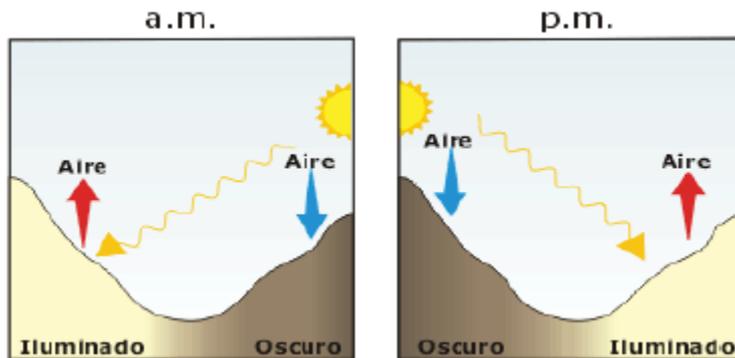


Nota: adaptado de (Martínez Molina & Bohórquez Quiroz, 2009)

En las noches cuando la tierra se enfría (más rápido que el agua) pasa lo contrario, puesto que el aire tibio que se encuentra sobre el agua sube, y es reemplazado por el aire frío que se encuentra en el continente, formando corrientes de aire sobre el mar y lagos.

Hay corrientes parecidas que se forman en los continentes, como en las montañas. Cuando una cara da al sol, se calienta, entonces el aire sube durante el día, y en la noche, al bajar la temperatura, el aire baja en forma de niebla. En el hemisferio sur el efecto ocurre en las laderas de cara al norte. En los Alpes se conocen como vientos Foehn y en los Andes se conocen como vientos Zonda.

Figura 2. Brisa de valle y montaña



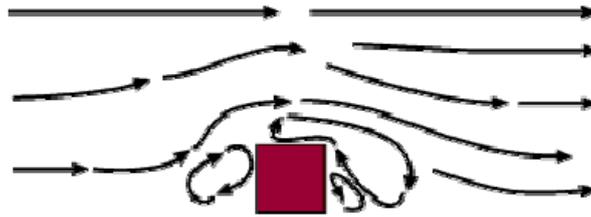
Nota: adaptado de (Martínez Molina & Bohórquez Quiroz, 2009)

Otras corrientes se presentan debido al efecto de Coriolis, causado por la rotación del planeta sobre su eje. La inercia del aire frío que viaja cerca de la superficie hacia la línea ecuatorial se desvía hacia el Occidente. Lo contrario sucede con las masas de aire caliente que viajan por lo alto hacia los polos, se desvían hacia el oriente. Combinando estos movimientos, se obtiene una circulación del aire en sentido anti-horario en el hemisferio norte y otra en sentido horario en el hemisferio sur.

Adicionalmente se suman las variaciones que ocurren durante las estaciones. Esto se debe a que el eje de giro de la tierra tiene una inclinación de 23.5° . Este efecto afecta directamente la cantidad de calor que llega del sol en cada estación, provocando cambio en la fuerza y dirección de los vientos. Esto quiere decir que el viento se comporta de diferentes maneras, en el mismo sitio geográfico durante los diferentes períodos del año, pero hay patrones que se repiten cada año. (Alean Vanegas & Herrón Gómez, 2007)

La velocidad del viento se puede disminuir en gran medida por obstáculos y rugosidades. Esta disminución depende de la porosidad del obstáculo, el efecto de frenado del viento que un obstáculo produce aumenta con la altura y la longitud del mismo. Obstáculos del viento como edificios, árboles, formaciones rocosas, entre otros, pueden disminuir la velocidad del viento de forma significativa y a menudo crean turbulencias en torno a ellos como se ve en la Figura 3. Las turbulencias disminuyen la posibilidad de utilizar la energía del viento de forma efectiva en un aerogenerador. También provocan mayores roturas y desgastes en la turbina eólica.

Figura 3. Obstáculos del viento



Nota: adaptado de (Alean Vanegas & Herrón Gómez, 2007)

1.2 Recurso eólico en Colombia

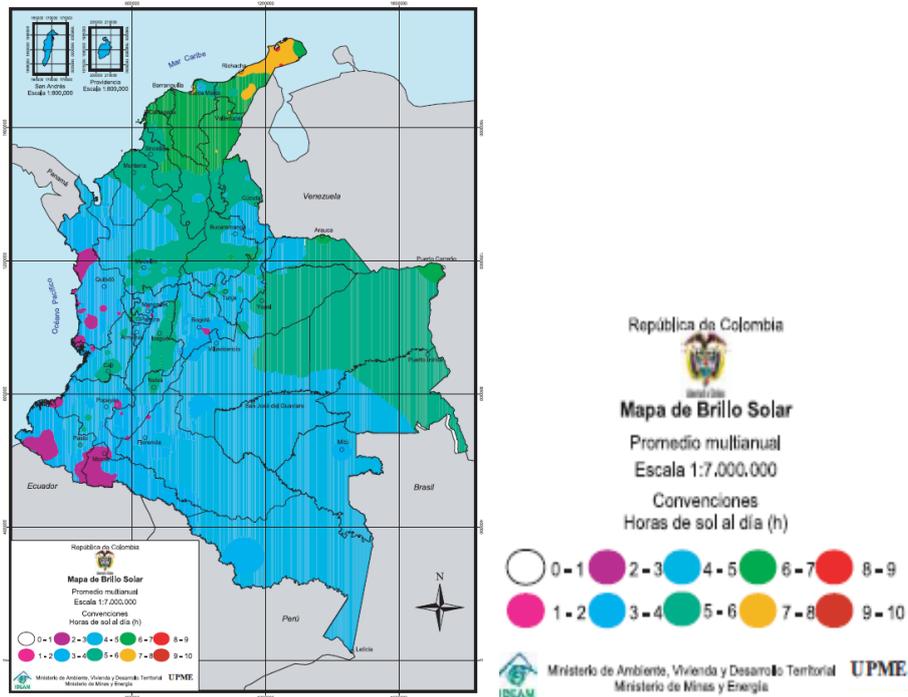
Las energías renovables se presentan cada día como una nueva posibilidad para el suministro de energía a nivel mundial. Hoy en día la energía solar y eólica ha venido tomando más importancia en los desarrollos que se han venido realizando relacionados con recursos renovables. Estas dos, son posiblemente fuentes potenciales para el desarrollo de sistemas portátiles que permitan el suministro de energía para campamentos transitorios.

Las aplicaciones eólicas pueden destacarse sobre las soluciones fotovoltaicas basadas en la energía solar, debido a que la operación de las últimas requieren del suministro energético del sol para su operación, condición que se da por determinados períodos de tiempo a lo largo del día (Figura 4 y Figura 5), además el costo de inversión y el peso de algunos componentes importantes como son las baterías o paneles es alto.

En la Figura 4 mediante convenciones de colores, donde la variación desde el blanco hasta el rojo indica una mayor intensidad, se muestra el mapa del promedio anual diario del número de horas de sol, brillo solar, sobre el territorio colombiano.

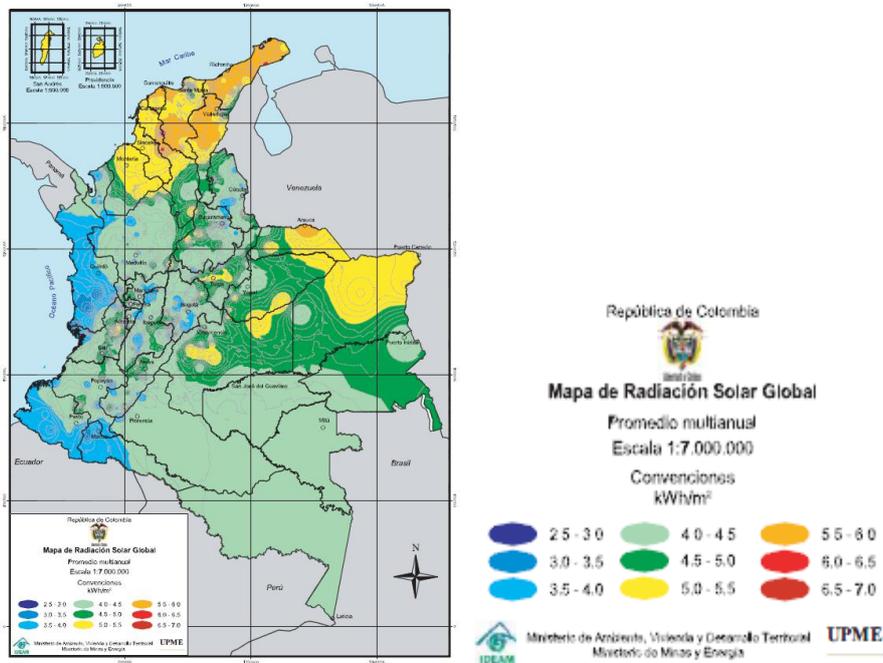
En la Figura 5 se ilustra una aproximación de promedio anual diario de la cantidad de energía de radiación solar que incide por metro cuadrado de superficie horizontal sobre el territorio colombiano.

Figura 4. Número de horas que en promedio durante un día de cada año se puede observar el sol en el cielo



Nota: adaptado de (IDEAM & UPME, Atlas de radiación solar de Colombia, 2006)

Figura 5. Promedio anual de energía de radiación solar que incide por metro cuadrado en Colombia



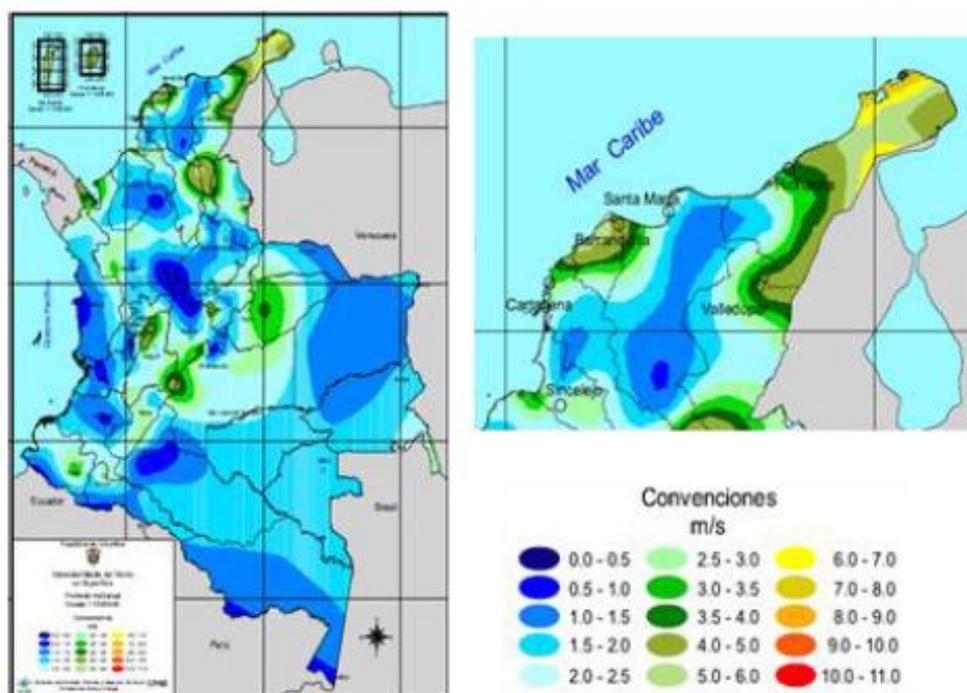
Nota: adaptado de (IDEAM & UPME, Atlas de radiación solar de Colombia, 2006)

El viento por su parte, aunque presenta intermitencias al igual que la radiación, puede presentar picos de suministro en horas de la noche (dependiendo del sitio de emplazamiento) que pueden coincidir con las horas de demanda de carga de los campamentos.

Colombia está ubicada geográficamente en el Trópico de Cáncer y el Trópico de Capricornio, por lo tanto está sometida a vientos alisios (que soplan del noreste en el hemisferio norte y del sureste en el hemisferio sur); su ubicación también determina que la fuerza de Coriolis es muy pequeña, siendo los vientos influenciados por las condiciones topográficas (por ejemplo, las irregularidades que presenta la cordillera de los Andes al ser ramificada a lo largo del territorio, y también los mares).

En las regiones llanas del país, como la llanura del Caribe, la Orinoquía y la Amazonía, las circulaciones definidas están influenciadas directamente por los vientos alisios, pero en los valles interandinos y zonas montañosas, las condiciones físicas determinan la velocidad y dirección del viento. Todo esto se puede observar en la Figura 6, que muestra el promedio anual de la velocidad del viento, sin embargo estas velocidades varían a lo largo del año.

Figura 6. Promedio anual de velocidad del viento en superficie (10m de altura) sobre el territorio colombiano

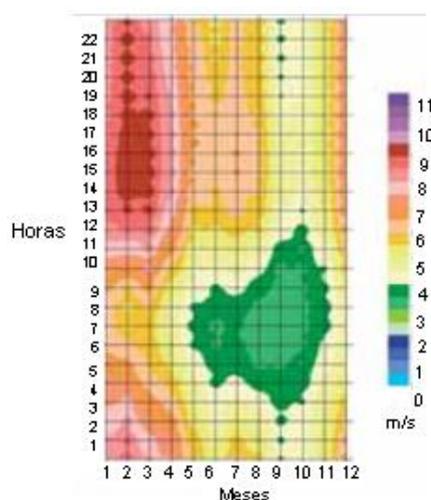


Nota: adaptado de (IDEAM & UPME, Atlas de viento y energía eólica de Colombia, 2006)

Se observa, que en algunos sectores la velocidad del viento presenta intensidades que superan los 5 m/s, persistentes a lo largo del año. Esto quiere decir que existe alto potencial para el desarrollo de energía eólica en departamentos como la Guajira, San Andrés, oriente de Boyacá, sectores de Casanare, Bolívar y Atlántico. Sin embargo, aunque en otros sectores la intensidad del viento no es tan alta, hay épocas del año en las que regiones como Norte de Santander, Eje Cafetero, región Andina y los llanos Orientales, puede ser eficiente.

En la Figura 7 se observa que el viento en la estación meteorológica Galerazamba (departamento de Bolívar) presenta intensidades que superan los 5 m/s en las horas de la tarde, durante todo el año. Específicamente, los tres primeros meses se pueden alcanzar intensidades superiores a 8 m/s entre las 2 y las 6 de la tarde.

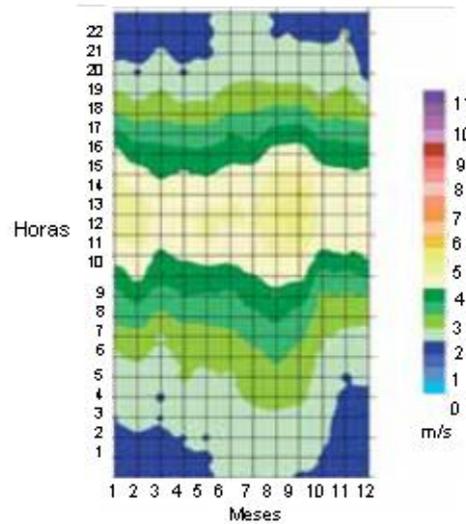
Figura 7. Variabilidad diurna del viento a lo largo del año para la estación meteorológica Galerazamba-Bolívar



Nota: adaptado de (IDEAM & UPME, Atlas de viento y energía eólica de Colombia, 2006)

Del mismo modo, como se puede observar en la Figura 8, el viento en la estación meteorológica de Urao (departamento de Antioquia) presenta intensidades cercanas a los 5 m/s entre las 12 m y las 3 pm, durante todo el año. En el resto del día se pueden presentar intensidades de viento entre los 2 y 4 m/s, lo que lo hace apto para el emplazamiento de aerogeneradores de baja velocidad.

Figura 8. Variabilidad diurna del viento a lo largo del año para la estación meteorológica Urrao-Antioquia



Nota: adaptado de (IDEAM & UPME, Atlas de viento y energía eólica de Colombia, 2006)

1.3 La energía del viento

Un aerogenerador obtiene su potencia de entrada convirtiendo la fuerza del viento en un par, actuando sobre las palas del rotor. La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, del área de barrido del rotor y de la velocidad del viento (Danish Wind Industry Association, 1997).

En la Tabla 1 se observa la clasificación del viento según la velocidad a la que se mueve. Es importante tener en cuenta esta tabla para la caracterización del aerogenerador a diseñar, puesto que define las intensidades del viento en las que puede operar el aerogenerador según las especificaciones de diseño, estas serían entre “ligero” y “fresco”.

Se sabe que la energía cinética de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa. De este modo, la energía cinética del viento depende de su densidad. A una presión atmosférica estándar (1 atm: 1.013 bar, definida por ISA-*International Standard Atmosphere*) y a 15 °C el aire tiene una densidad de 1,225 kg/m³, aunque la densidad disminuye ligeramente con el aumento de la humedad. Además, la densidad aumenta cuando la temperatura baja. A grandes altitudes (en las montañas) la presión del aire es más baja y el aire es menos denso. (Danish Wind Industry Association, 1997)

Tabla 1. Escala de velocidades de viento

Velocidades de viento a 10 m de altura		Escala Beaufort (anticuada)	Viento
m/s	nudos		
0,0-0,4	0,0-0,9		Calma
0,4-1,8	0,9-3,5	1	
1,8-3,6	3,5-7,0	2	Ligero
3,6-5,8	7-11	3	
5,8-8,5	11-17	4	Moderado
8,5-11	17-22	5	Fresco
11-14	22-28	6	
14-17	28-34	7	Fuerte
17-21	34-41	8	
21-25	41-48	9	Temporal
25-29	48-56	10	
29-34	56-65	11	Fuerte temporal
>34	>65	12	Huracán

Nota: adaptado de (Danish Wind Industry Association, 1997)

1.4 Potencia del viento

La velocidad del viento es muy importante para determinar la cantidad de energía que un aerogenerador puede transformar en electricidad. La cantidad de energía que posee el viento varía con el cubo de la velocidad del viento. Esto quiere decir que cuando la velocidad del viento se duplica, entonces la cantidad de energía que contenga será ocho veces mayor ($2^3 = 2 \times 2 \times 2 = 8$), teniendo en cuenta la relación matemática que relaciona a estos dos parámetros.

La potencia de viento disponible (P_d) para un aerogenerador se define mediante la ecuación 1:

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

Donde:

P_d : Potencia disponible (W)

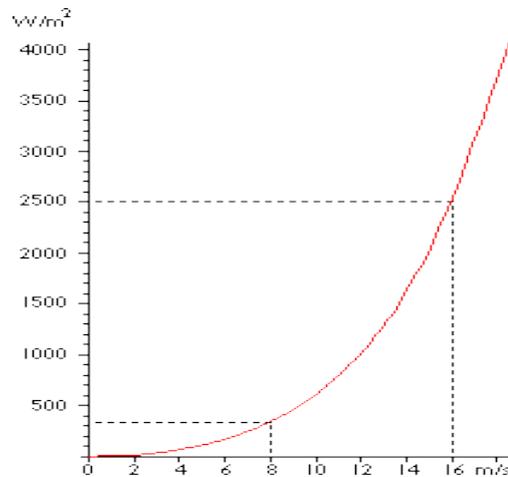
ρ : densidad del aire (Kg/m^3)

A: área transversal del aerogenerador (m^2)

v: velocidad del viento (m/s)

La Figura 9 muestra que con una velocidad del viento de 8 m/s se obtiene una potencia de 314 W/m^2 . A 16 m/s se obtiene una potencia ocho veces mayor, esto es, 2509 W/m^2 .

Figura 9. Potencial eólico respecto a la velocidad del viento



Nota: adaptado de (Danish Wind Industry Association, 1997)

1.5 Distribución de Weibull

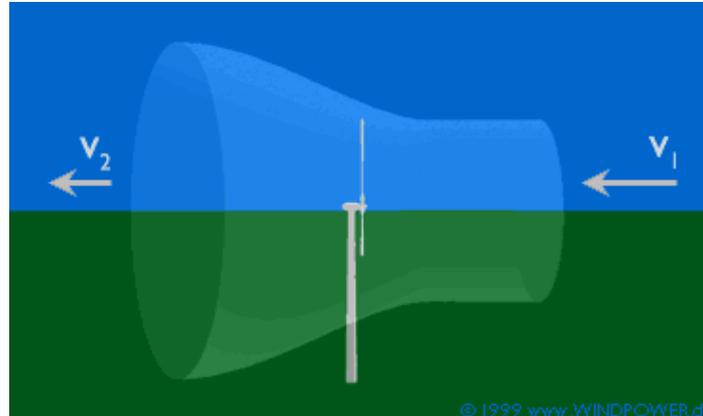
Si se miden las velocidades de viento a lo largo de un año en un sitio, se observará que en la mayoría de áreas los fuertes vendavales son raros, mientras que los vientos frescos y moderados son comunes. Esta variación del viento se describe utilizando la Distribución de Weibull, sin embargo para este trabajo no aplica puesto que no se hará un estudio de campo por un largo período de tiempo.

1.6 Ley de Betz

En los aerogeneradores la potencia aprovechada es limitada según la ley de Betz, la potencia aprovechada se puede calcular mediante la ecuación 2, mientras mayor sea la energía cinética que un aerogenerador extraiga del viento, mayor será la disminución de la velocidad que sufrirá el viento a la salida. Esto establece que ningún

generador puede extraer del viento una potencia superior a la establecida por esta ley (se puede observar en la Figura 10). (Martínez Molina & Bohórquez Quiroz, 2009)

Figura 10. Desviación del viento



Nota: adaptado de (Danish Wind Industry Association, 1997)

La ley de Betz dice que sólo puede convertirse menos de 16/27 (el 59%) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador. Esto se demuestra a continuación. (Martínez Molina & Bohórquez Quiroz, 2009)

La potencia aprovechada (P_a) que el aire transfiere al generador es:

$$P_a = \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2) \quad (2)$$

Donde:

P_a : Potencia aprovechada (W)

ρ : densidad del aire (Kg/m^3)

A: área transversal del aerogenerador (m^2)

V_1 : velocidad del viento a la entrada (m/s)

V_2 : velocidad del viento a la salida (m/s)

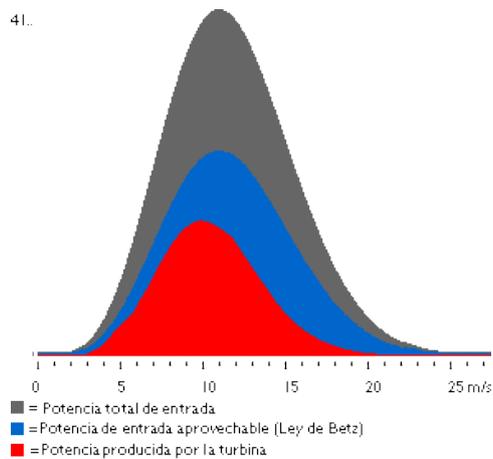
1.7 Densidad de potencia

Se debe tener en cuenta que no toda la potencia disponible será aprovechada por el aerogenerador. Para determinarla se deben hacer pruebas de campo y realizar

gráficos del funcionamiento del aerogenerador con respecto a las velocidades de viento presentadas en el lugar de emplazamiento.

Normalmente, los aerogeneradores comunes están diseñados para empezar a girar a velocidades de 3-5 m/s (llamada velocidad de conexión). El área azul de la izquierda de la Figura 11, muestra la pequeña cantidad de potencia perdida debido al hecho de que la turbina sólo empieza a funcionar a partir de 3 m/s y en teoría funcionaría a partir de los 2 m/s.

Figura 11. Densidad de potencia



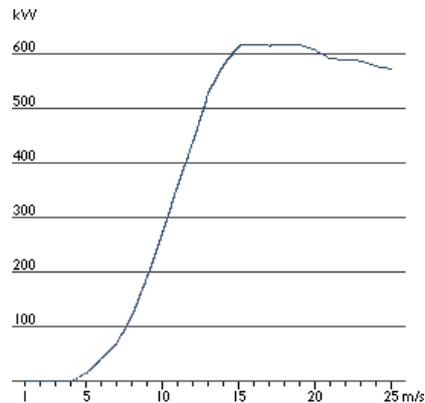
Nota: adaptado de (Danish Wind Industry Association, 1997)

Un aerogenerador se programa normalmente para pararse a altas velocidades del viento, de alrededor de 25 m/s (llamada velocidad de corte), para evitar posibles daños en la turbina o sus alrededores. El área azul de la derecha de la Figura 11, representa la pérdida de potencia del aerogenerador con respecto a la energía aprovechable según la ley de Betz. (Danish Wind Industry Association, 1997)

1.8 Curva de potencia

La curva de potencia de un aerogenerador (presentada en la Figura 12) es un gráfico que indica cuál será la potencia eléctrica disponible en el aerogenerador a diferentes velocidades del viento. La curva típica de potencia se construye por medidas directas de la potencia eléctrica y la velocidad medida a la altura del centro del rotor y depende de cada aerogenerador. Luego se lee la potencia eléctrica disponible directamente del generador.

Figura 12. Curva de potencia de un aerogenerador de 600 KW

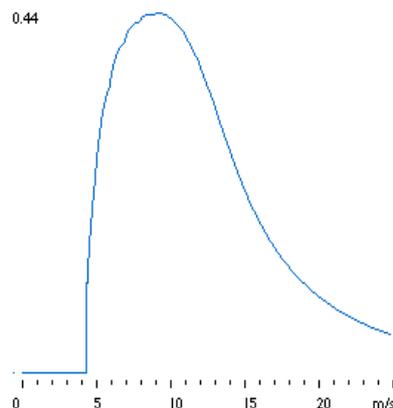


Nota: adaptado de (Danish Wind Industry Association, 1997)

1.9 Coeficiente de Potencia

El coeficiente de potencia indica con qué eficiencia el aerogenerador convierte la energía del viento en electricidad como se puede ver en la 13, donde el eje X de la grafica indica la velocidad del viento (m/s) y el eje Y indica la eficiencia mecánica (expresada de 0 a 1). Se obtiene dividiendo la potencia eléctrica disponible por la potencia eólica de entrada, para medir qué tan eficiente (técnicamente) es un aerogenerador. En otras palabras, se toma la curva de potencia y se divide por el área del rotor para obtener la potencia disponible por unidad de área del rotor. Posteriormente, para cada velocidad del viento, se divide el resultado por la cantidad de potencia por metro cuadrado.

Figura 13. Coeficiente de potencia



Nota: adaptado de (Danish Wind Industry Association, 1997)

La Figura 13 muestra la curva del coeficiente de potencia para un aerogenerador danés típico. Aunque la eficiencia media de estos aerogeneradores suele estar por encima del 20%, la eficiencia varía con la velocidad del viento. Como se puede observar, la eficiencia mecánica del aerogenerador más alta (44%) se obtiene a velocidades alrededor de 9 m/s. A bajas velocidades del viento la eficiencia no es tan alta, puesto que no hay mucha energía que utilizar. A altas velocidades del viento, la turbina debe disipar cualquier exceso de energía por encima de aquella para la que ha sido diseñado el generador. Así pues, la eficiencia interesa sobre todo en la zona de velocidades de viento donde se encuentra la mayor parte de la energía. (Danish Wind Industry Association, 1997)

1.10 Análisis estructural

Cuando se construyen aerogeneradores, debe tenerse en cuenta la resistencia, el comportamiento dinámico y las propiedades de fatiga de los materiales y de todo el conjunto. Las turbinas con alta cantidad de palas o con palas muy anchas (turbinas con un rotor muy sólido), estarán sujetas a fuerzas elevadas (dependiendo del diámetro del rotor y el material de las palas), cuando el viento sopla a velocidad de huracán (mayor a 32 m/s). Para limitar la influencia de los vientos extremos, los fabricantes optan por construir las con pocas palas, largas y estrechas.

Los aerogeneradores están sujetos a vientos fluctuantes y, por tanto, a fuerzas cambiantes. Esto se da particularmente en el caso de estar emplazados en un clima eólico muy turbulento. Los componentes sujetos a una flexión repetida pueden desarrollar grietas, que pueden provocar la rotura del componente. Es por esto que uno de los principales problemas que se tienen en la industria es el control de fatiga del material, en el caso específico del metal es rechazado por las limitaciones que presenta relacionado con este problema. (Danish Wind Industry Association, 1997)

Fuerza del viento en el rotor

Ésta se puede calcular mediante la ecuación 3:

$$F_R = \frac{1}{2} * \rho * \pi * v_{viento}^2 * R_{rotor}^2 * C_r(\lambda) \quad (3)$$

Donde:

F_R : fuerza del viento ejercida en el rotor (N)

ρ : densidad del aire (Kg/m^3)

V_{viento} : velocidad del viento considerada (m/s)

R_{Rotor} : radio del rotor (m)

$C_r(\lambda)$: coeficiente de empuje en función de λ

Para calcular el valor de λ , mejor conocida como TSR se puede utilizar la ecuación 4:

$$\lambda = \frac{\Omega * R_{\text{rotor}}}{v_{\text{viento}}} \quad (4)$$

Donde:

Ω : velocidad angular del rotor (rad/s)

Velocidad específica óptima de diseño

Puede ser calculada mediante la ecuación 5:

$$\lambda_0 = \frac{U}{V_D} = \frac{\pi * N * d}{60 * V_D} \quad (5)$$

Donde:

λ_0 : velocidad específica (m/s)

U : velocidad tangencial al extremo de la pala (m/s)

V_D : velocidad del viento de diseño (m/s)

N : velocidad de giro de la turbina eólica (r.p.m)

d : diámetro del rotor (m)

Vibración

El análisis de vibración es uno de los elementos más importantes para el diseño de aerogeneradores, sin embargo, para éste se debe disponer de un equipo electrónico

con el cual se pueda realizar un estudio completo del sistema específico, obteniendo un diagnóstico de su estado. Para este trabajo de investigación no se cuenta con el equipo específico necesario, por lo que no se realizará la prueba, sin embargo se tendrá en cuenta el efecto de la vibración sobre la eficiencia que se obtenga con el prototipo.

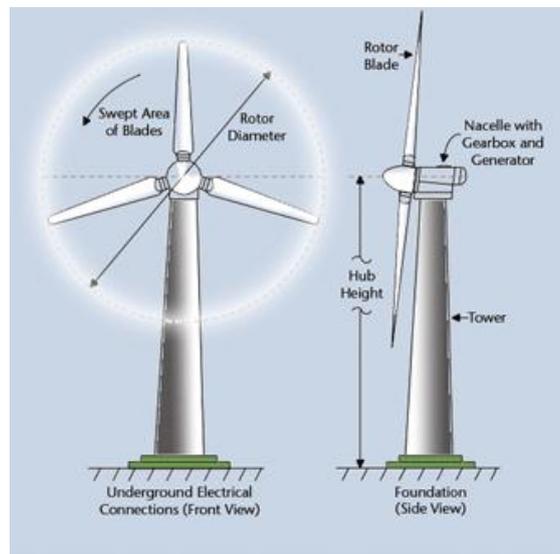
2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

2.1 Concepto de aerogenerador

Un aerogenerador es un generador eléctrico, el cual es movido por una turbina accionada por el viento, es por esto que recibe el nombre de turbina eólica. Los aerogeneradores han sido usados desde mucho tiempo atrás (algunos estudios datan del siglo I a.C), siendo una de sus primeras aplicaciones como molinos de viento, usados para fines de molienda y para la obtención de harina.

En la actualidad existen diferentes tipos de aerogeneradores y su clasificación puede estar dada dependiendo de su potencia, disposición de su eje de rotación, el tipo de generador que usa, las velocidades y las condiciones con las que opere. En la Figura 14 se puede observar uno de los tipos, el de eje horizontal.

Figura 14. Aerogenerador de eje horizontal (HAWT)



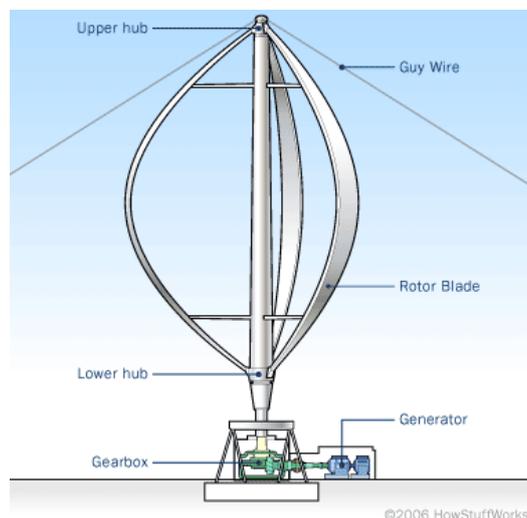
Nota: tipos de aerogeneradores, adaptado de (Word Press, 2008)

Los aerogeneradores se pueden clasificar básicamente en dos: de eje vertical (VAWT) y de eje horizontal (HAWT). (Tipos de energía, 2006)

Los HAWT son los más utilizados y de mayor potencia, se pueden distinguir tres tipos:

- *Molinos de viento convencionales*: clásicos molinos usados antiguamente. En la actualidad se conservan como monumento histórico pero no prestan servicio.
- *Aerogeneradores lentos*: generadores con un elevado número de palas. Generalmente su sistema de orientación es mediante un timón-veleta que hace que el plano de la hélice se sitúe siempre perpendicular a la dirección del viento. Similares a los molinos de viento convencionales, pero en menor escala.
- *Aerogeneradores rápidos*: aerogeneradores con número de palas menor. Su ventaja frente a los lentos es que su potencia por unidad de peso es mucho mayor, y al ser más ligeros pueden construirse de radio mayor, así como situar el punto de giro central del rotor a alturas mayores y por consiguiente aprovechar el efecto de aumento de la velocidad del viento con la altura. En la actualidad se construyen generadores de este tipo con diámetros de rotor que alcanzan los 90 m y con una potencia nominal superiores a 3 MW. La empresa Gamesa tiene dentro de su catálogo aerogeneradores con potencia nominal entre los 850 KW hasta los 5 MW, otra empresa que tiene dentro de sus productos este tipo de aerogeneradores es Enercon GmbH.

Figura 15. Aerogenerador de eje vertical (VAWT)



Nota: tipos de aerogeneradores, adaptado de (Word Press, 2008)

Los VAWT (presentado en la Figura 15) no son tan usados como los HAWT, puesto que se han realizado numerosos prototipos, pero por razones técnicas y económicas su implementación en la práctica es muy limitada. Se caracterizan por que el viento

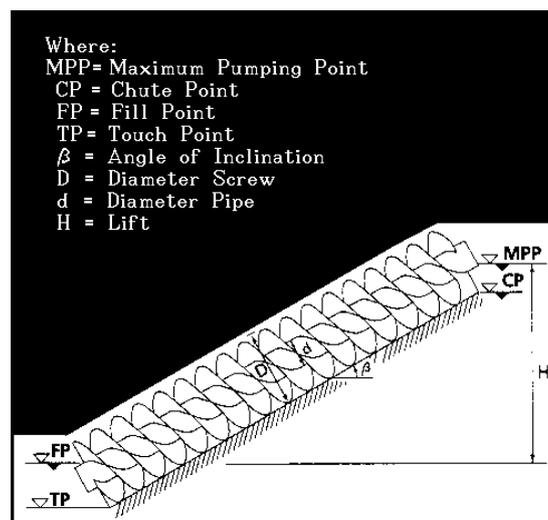
incide de forma perpendicular a la dirección de rotación de su eje, garantizando en todo momento que giren respecto a la velocidad del aire circundante, por lo tanto estos aerogeneradores no dependen de una orientación alguna para producir electricidad, siempre y cuando exista viento. Se suelen encontrar los siguientes tipos:

- *Rotor de arrastre diferencial, con o sin pantalla (Savonius):* se basa en la diferencia de la fuerza aerodinámica que ejerce un flujo de aire sobre objetos de distinta forma. Debido a que la fuerza que origina el par es la diferencia entre los álabes o paletas del rotor, este tipo de máquina recibe el nombre de arrastre diferencial.
- *Rotor de variación cíclica de incidencia (Darrieus):* rotor que está formado por un conjunto de álabes, unidos entre sí, que pueden girar alrededor de un eje vertical y cuya sección transversal tiene forma de un perfil aerodinámico. El giro del rotor es producido por la acción aerodinámica del viento sobre los álabes, que origina fuerzas aerodinámicas que dan lugar al par de rotación.

2.2 Tornillo de Arquímedes

El tornillo de Arquímedes fue inventado hace más de 2000 años y se utilizaba principalmente para elevar el agua. Desde entonces se ha probado y modificado para otros usos, tales como hélices, que llevaron al desarrollo de la hélice de tornillo moderna (ver Figura 16).

Figura 16. Tornillo de Arquímedes

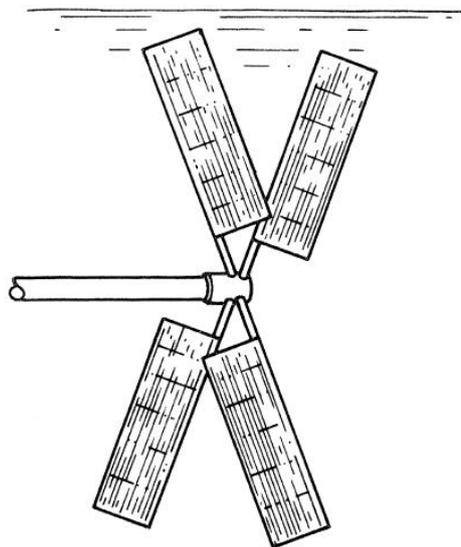


Nota: adaptado de (Barbato, Fredette, Kamon, & White, 2004)

Tanto a Arquímedes como a Leonardo da Vinci, se les puede dar el mérito de haber considerado diseños e ideas que posteriormente serían exploradas por ingenieros de propulsión de buques. En el caso de Arquímedes, su pensamiento centrado en la aplicación de la bomba de tornillo, que lleva su nombre, proporcionó inspiración a los ingenieros del siglo XIX que intervinieron en la propulsión marina. En contraste Leonardo da Vinci, en sus cuadernos que se produjeron 1700 años después, muestra una forma alternativa de propulsión de tornillo, basada en la idea de utilizar las aspas del ventilador que tienen una apariencia similar a los utilizados para fines de refrigeración en la actualidad.

El desarrollo de la propulsión con tornillo tal y como se conoce hoy, se remonta a la obra de Robert Hooke, mejor recordado por su trabajo en la elasticidad de materiales. Hooke en sus “Colecciones filosóficas”, explica el diseño de un molino de agua horizontal, que fue notablemente similar en su principio de funcionamiento a la hélice de eje vertical de Kirsten-Boeing, desarrollada dos siglos y medio más tarde. El molino de agua de Hooke comprendía cuatro aspas de madera, engranadas a un eje central, y fijadas verticalmente a un rotor circular horizontal (como se puede observar en la Figura 17).

Figura 17. Hélice de Hooke (1683)



Nota: adaptado de (Carlton, 2007)

2.3 Concepto de ala inflable

Mientras el concepto de estructuras inflables (como globos o dirigibles) para volar se originó siglos atrás, las alas inflables sólo se concibieron y desarrollaron hace unas pocas décadas. Uno de los usos más recientes de ala inflable se aplica al diseño de aeronaves tripuladas. Las alas inflables fueron demostradas con éxito en los años 50, el Inflatoplano de Goodyear con una envergadura de 6.7 m es un ejemplo (ver Figura 18), esta aeronave fue desarrollada como avión de rescate militar que podía descender tras las líneas enemigas para rescatar pilotos derribados. (Simpson, Jacob, & Smith, 2005)

Figura 18. Inflatoplano de Goodyear (1957)



Nota: adaptado de (Brown, Haggard, & Norton, 2001)

El desarrollo de la tecnología, incluyendo la entrega de decenas de aviones, se prolongó hasta la década de 1970. Más recientemente, el Stingray (un ultraligero monoplaza) ha sido probado en vuelo. Usando cuerdas como vigas, el vehículo tiene 13 m de envergadura y 70 m³ de volumen interno. El diseñador propuso usar helio como gas de inflado para proporcionar un componente adicional de sustentación. Históricamente se han desarrollado otras aeronaves con ala inflable, especialmente UAV'S (vehículos aéreos no tripulados, como los desarrollados por la empresa ILC DOVER, ver Figura 19) para uso de observación aérea. (Simpson, Jacob, & Smith, 2005)

Figura 19. UAV inflable de ILC DOVER (1970)



Nota: adaptado de (DOVER)

Una de las ventajas de las alas inflables es que su flexibilidad les da la capacidad de recuperarse de ráfagas y golpes. También da la oportunidad de cambiar la forma del ala activamente para su control. Sin embargo, esta flexibilidad tiene una desventaja. Es necesario tener la rigidez suficiente para una capacidad de carga determinada ya sea de alta presión, alas gruesas, baja relación de aspecto o una combinación de estos factores. Una forma de mejorar la capacidad de carga y la rigidez de las alas inflables, manteniendo la mayor parte de las ventajas, es el uso del concepto estructural de "*Tensegrity*" (Tensegridad). (Breuer, Ockels, & Luchsinger). Este es un principio estructural basado en el empleo de elementos aislados a compresión (barras) que se encuentran en una red de elementos a tracción (cables) que delimitan el espacio de la estructura.

El concepto de ala inflable se aplica en parapentes y paracaídas, siendo esta la que se busca aplicar al diseño del aerogenerador portátil. El parapente "Ram-air", cuando se infla, obtiene una relación de aspecto baja. Es construido a partir de tela y ningún miembro rígido, lo que permite que se empaque y despliegue de manera similar a un paracaídas convencional. El ala tiene superficies de membranas superior e inferior, una sección transversal aerodinámica, y una forma en planta rectangular. (Lingard, 1995)

La sección de perfil aerodinámico está formada por costillas en forma de plano aerodinámico cosido en dirección de la cuerda, entre las membranas superior e inferior, en una serie de intervalos en dirección de la envergadura formando una serie de celdas. El borde de ataque del ala está abierto en toda su longitud para que la presión del aire inflado mantenga la forma del ala. Las costillas suelen tener aberturas en ellas, esto permite la transmisión de la presión de una celda a otra en el inflado y la igualación de presión después. La tela usada en la fabricación de parapentes "Ram-air" es tan poco porosa como sea posible para evitar la pérdida de presión. (Lingard, 1995)

2.4 Aerogeneradores portátiles existentes en el mercado

Existen aerogeneradores portátiles actualmente en el mundo, que se emplean para diferentes finalidades. A continuación se mencionan algunos:

- *Greenerator*: idea del diseñador Jonathan Globerson en fase de prototipo, es un generador de eje vertical diseñado para funcionar desde un balcón y utiliza tanto energía eólica como solar. (Greenerator, 2011)
- *AERO-E*: diseño de Lance Cassid, es un generador de eje horizontal que se puede instalar en la parte exterior de una ventana para cargar aparatos electrónicos. (Aero E, 2011)
- *EOLIC*: aerogenerador de eje horizontal tipo doméstico plegable, lo que facilita bastante su transporte y permite que pueda ser utilizado en la construcción de lugares donde no hay suministro de energía eléctrica. La idea es que también pueda ser una alternativa energética en viviendas reducidas. (Eolic, 2010)
- *HYMINI*: creación del fundador de MINIWIZ, Arthur Huang que funciona también con energía solar. Necesita vientos entre 14 y 64 km/h. (Hymini, 2007)
- *Orange Wind Charger*: generador desarrollado en Inglaterra, de eje horizontal, utilizado para cargar celulares. (Orange wind generator)
- *Solar Stik Breeze*: generador transportable que pesa alrededor de 45 kilos y que cuenta con un par de paneles solares de 50-watts cada uno, además de una turbina eólica de 200 Watts de eje horizontal. (Solar stik breeze, 2008)

La diferencia principal entre estos generadores y el diseño propuesto en este trabajo, es que estos generadores en su mayoría son de eje horizontal (a excepción del Greenerator), lo que hace difícil encontrar un lugar adecuado donde pueda ser instalado y que trabaje de forma eficiente. Por eso se propone buscar una nueva geometría de las palas del aerogenerador, de modo que sea de eje vertical, combinando el concepto de ala inflable y tornillo de Arquímedes, haciéndolo más liviano y portable.

3. SELECCIÓN DE MATERIALES

La selección de materiales es uno de los pasos principales para el diseño del aerogenerador portátil, debido a que se requieren para éste materias primas con características como bajo peso, flexibilidad, portabilidad y con capacidad de adaptarse a una estructura deformable.

3.1 Material principal

Teniendo en cuenta los requerimientos de diseño, se compara la tela con otros materiales usados normalmente como materia prima para la construcción de las aspas de aerogeneradores típicos, esta comparación se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Comparación de materiales

Material	Propiedades							
	Resistencia a tensión		Peso (Densidad)		Impermeabilidad		Precio	
Ripstop	2% elongación antes de rotura		42*	gr/m ²	3000	mm H2O	27000	COP/m ²
Tela (colombiana)	15% elongación antes de rotura		104	gr/m ²	sin información		8000	COP/m ²
Aluminio	200-600	MPa	2,7	gr/cm ³	N/A		21000	COP/m ²
Fibra de vidrio	4130	MPa	2,5	gr/cm ³	N/A		60000	COP/m ²
Fibra de carbono	5515	MPa	1,8	gr/cm ³	N/A		103270	COP/m ²

*Depende del proceso de fabricación, varía entre 40 y 120 gr/m², debe ser importada

Nota: adaptado de (Fabricato), (Into the wind) y (Askeland)

Como se observó en la Tabla 2 la tela tipo Rip-stop que posee las condiciones adecuadas para ser implementada en el diseño, debido a su bajo peso, baja porosidad (impermeabilidad) y resistencia al desgarre (debido a que tanto la trama como la urdimbre está reforzada con hilos de alta resistencia), estas características se especifican en la Tabla 3. Este tipo de tela está conformada en patrones cuadrículados de pequeñas dimensiones, con este patrón una rasgadura se detiene inmediatamente al llegar al siguiente, evitando un desgarre total de la tela.

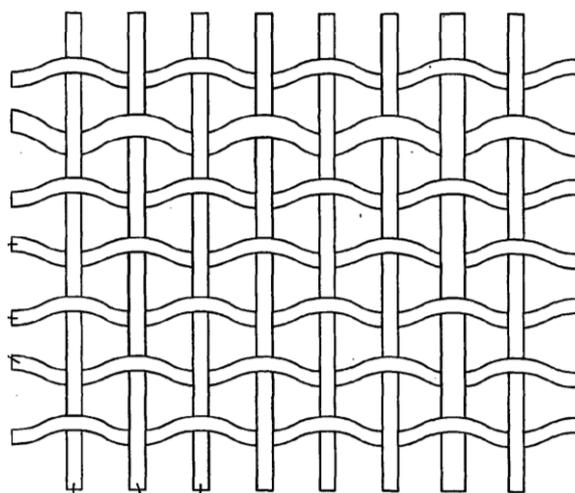
La selección de esta tela en especial, está dada principalmente por sus aplicaciones en el mercado de la aviación, debido a que es la utilizada en la fabricación carpas, globos aerostáticos, parapentes, paracaídas y cometas, los cuales en su concepción

de diseño buscan parámetros muy similares a los que se necesitan para el diseño propuesto (bajo peso, baja porosidad, resistencia a la rotura, entre otros).

La tela Rip-stop está conformada por diferentes capas, como se ilustra en la

Figura 20. En Colombia se puede adquirir una tela con condiciones similares a la Rip-stop (de baja porosidad y bajo peso), sin embargo no de la misma calidad (alta resistencia a la rotura), por lo tanto es más económica. De este modo, si en algún momento es necesario disminuir costos de producción, podría comprarse la tela nacional, teniendo en cuenta las diferencias en las propiedades.

Figura 20. Esquema estructural de la tela Ripstop



Nota: adaptado de (Allen & Creech, 2011)

En la Tabla se muestran las especificaciones técnicas de la tela seleccionada.

Tabla 3. Especificaciones técnicas de la Rip-stop

COMPOSICIÓN	100% Poliéster
CONSTRUCCIÓN	75 D X 75 D Ripstop 2 mm x 2 mm
TERMINACIÓN	Poliuretano de alta densidad micro-porosa
IMPERMEABILIDAD	3000 mm columna de agua
PESO	40-117 gr/m ²
ENCOGIMIENTO	2% lavado normal y 3% lavado industrial
ANCHO ÚTIL	150 cm

Nota: adaptado de (Empresa Fulltex)

Al estar compuesta en un 100% de poliéster, hace que el peso sea bajo y que la tela tenga baja elongación. Esta es una ventaja para lograr que se mantenga la forma de la estructura construida, aunque se apliquen fuerzas en diferentes direcciones.

3.2 Material estructural

Para darle forma a la estructura las varillas de fibra de vidrio o carbono son el mejor material, debido a su gran resistencia y ligereza. Estas varillas como se muestran en la Figura 22 están fabricadas con materiales sintéticos y se consiguen en el mercado en dos presentaciones básicas, las huecas o tubos que son más ligeras y las macizas que son más fáciles de producir.

La fibra de vidrio con relación al carbono, es más pesada y con menor módulo de elasticidad, aunque es más resistente a impactos, flexible, y de menor costo, dependiendo del tipo de vidrio del cual esté hecha. En cuanto a la fibra de carbono, sus propiedades pueden variar entre el tipo de carbono que se utilice ya sea de alta resistencia o de alto módulo.

Las propiedades de la fibra de vidrio y carbono pueden variar según el método de fabricación y materiales usados, sin embargo existen algunas aproximaciones, como se ve en la Tabla 4.

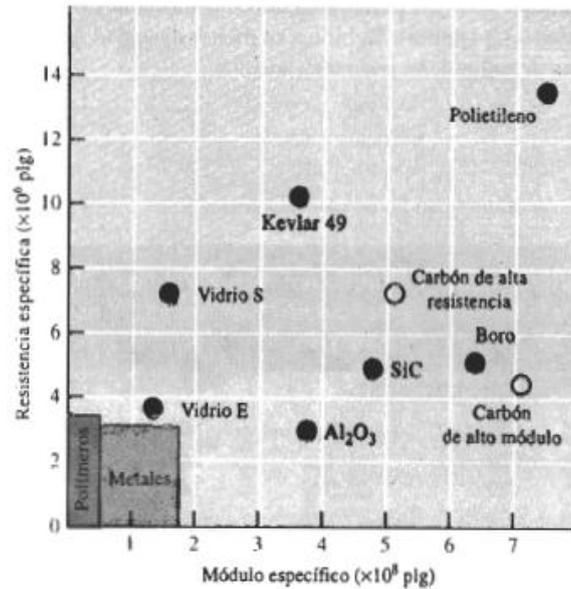
Tabla 4. Propiedades de la fibra de vidrio y de carbono

MATERIAL		DENSIDAD (g/cm ³)	RESISTENCIA A LA TENSIÓN (ksi)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (x10 ⁶ psi)	TEMPERATURA DE FUSIÓN (°C)	MÓDULO ESPECÍFICO (x10 ⁷ plg)	RESISTENCIA ESPECÍFICA (x10 ⁶ plg)
FIBRA DE VIDRIO	VIDRIO E	2.55	500	10.5	<1725	11.4	5.6
	VIDRIO S	2.50	650	12.6	<1725	14	7.2
FIBRA DE CARBONO	HS (ALTA RESISTENCIA)	1.75	820	40	3700	63.5	13
	HM (ALTO MÓDULO)	1.90	270	77	3700	112	3.9

Nota: adaptado de (Askeland)

Si se comparan los materiales citados en la Tabla 4 respecto a la resistencia específica se puede determinar que la el carbón de alta resistencia es la más alta, lo que lo hace apto para seleccionarlo, evidenciando de igual forma un alto módulo específico y menor densidad que la fibra de vidrio. Esto se puede evidenciar también en la Figura 21.

Figura 21. Resistencia y módulo específico de la fibra de vidrio y carbono



Nota: adaptado de (Askeland)

Teniendo en cuenta las condiciones de diseño y las propiedades de los materiales, se seleccionó la fibra de vidrio para la construcción de la estructura del aerogenerador. Las razones se basan principalmente en el menor costo de adquisición, además es la más usada para aplicaciones que requieren condiciones similares como bajo peso y alta resistencia (construcción de cometas y alas delta).

La fibra de vidrio fue desarrollada durante la década de 1930 para múltiples aplicaciones, especialmente relacionadas con la aviación. Entre sus aplicaciones más importantes se encuentra la construcción de botes y autos deportivos. Actualmente su uso en el sector automotriz y aeronáutico ha sido parcialmente reemplazado por la fibra de carbono, que tiene menor peso. La fibra de vidrio también es usada en la industria de las telecomunicaciones para el recubrimiento de las antenas. Debido al bajo peso y durabilidad, la fibra de vidrio es comúnmente empleada en equipos de protección, como cascos y actualmente es muy empleada en la construcción de cometas.

Figura 22. Varillas de fibra de vidrio



Nota: adaptado de (China suppliers)

4. SELECCIÓN DEL GENERADOR ELÉCTRICO

Los requisitos para el generador o dinamo a seleccionar se basan en los requisitos del aerogenerador, cuya principal característica es el bajo peso y la baja velocidad de rotación, por lo tanto se necesita un generador de baja potencia (aproximadamente 3W), que necesite bajas revoluciones por cada voltio generado (representado por kv), alta eficiencia y precio asequible en el mercado.

Con base en estos requerimientos se consultaron empresas de motores y dinamos como Hacker, Schmidt y Shimano, en las que se compararon diferentes modelos que presentan características similares, con el fin de determinar el óptimo para nuestra aplicación. Con la información recolectada se realizó una tabla de comparación, tomando como primer parámetro de selección el peso y en segundo lugar el precio en el mercado.

Tabla 5. Tabla de selección para el generador eléctrico

MARCA	REF	SERIE	PESO (g)	kv	POWER(W)	EFF	PRECIO
HACKER	A30	12-XL-V2	177	700	6500		96 EUR
	A40	10-S-V2-14-POLE	208	750	900		126 EUR
	A50	14-XS-V2	289	564	1250		138 EUR
		14-L-V2	430	300	1650		184 EUR
		14-L	510	300	1650		169 EUR
		14-L-8-POLE ELECTRIC TURBINE	465	540	3000		239 EUR
	A60	10-L-TURNADO	455	580			189 EUR
		6-XS-V2-28-POLE	480	370	1900		229 EUR
	Q60	18-L KV:149	910	149	2600		299 EUR
		7-M-F3A	520	210	2800		409 EUR
Q80	11-S-28-POLE-F3A	610	205	3000		479 EUR	
A40	12-L-8-POLE ELECTRIC TURBINE	315	930	2000		179 EUR	
SCHMIDT	SON	DELUX	390			65*	366 US
		28	440			65*	350 US
		28 CLASSIC	570			65*	285 US
		XS	400			60*	285 US
		XS-M	520			60*	299 EUR
SHIMANO	DH	NX-30	720			49*	
		3N-70	680			53*	120 EUR
		3N-71	680			53*	
		3N-72	558			53*	86.75 EUR
		3N-80B	680			53*	150 EUR
		F702	654				51.05 EUR

* Eficiencia (EFF) tomada a 15 km/h

Teniendo en cuenta los criterios de selección y comparando las alternativas planteadas en la Tabla 5, se podría decir que los motores de aerodelismo (marca Hacker) analizados tienen alta ventaja en cuanto a su peso y precio, sin embargo, fueron descartados puesto que requieren altas revoluciones para lograr el voltaje necesario para cargar cualquier sistema de comunicación básico, esto es, más de 1000 rpm para lograr generar 3 V. Por otro lado, aunque algunos funcionan a bajas revoluciones, su peso supera los 600 g, siendo una alta desventaja para esta aplicación.

En cuanto a los dinamo de bicicleta marca Shimano, no fueron escogidos debido a su alto peso en comparación con las otras alternativas que se tuvieron en cuenta para el proceso de selección.

Finalmente, de la Tabla se selecciona el dinamo Schmidt Son Delux (ver Figura 23) por su bajo peso y alta eficiencia, sin embargo, su costo es mayor que otros. Adicionalmente, se destaca el hecho que la empresa cuenta con una gran trayectoria en el mercado y le ofrece al cliente respaldo en cuanto a la garantía de sus productos. En la Tabla 6 se presentan las características generales del dinamo. También se tuvo en cuenta el dinamo Son XS, puesto que su precio es más asequible y la diferencia en peso con el Delux es de 10 gr, sin embargo cuando se hizo la compra, no se encontraba disponible a la venta.

Tabla 6. Especificaciones técnicas del generador Schmidt SON Delux

Potencia eléctrica	6V/3W
Eficiencia	65% a 15 Km/h en una llanta de 700c
Consumo sin carga	0.4 W a 15 Km/h en una llanta de 700c
Rotor magnético	Neodimio-Acero-Boro, 26 polos
Conexión	Pestañas planas de 4.8m, dos polos, libre de potencial
Eje	Eje hueco, ϕ 10mm, Aluminio 7075 T6
Extremos	Acero inoxidable
Rodamientos	Rodamientos de bolas 629-2RSH
Carcaza	Aluminio 6082 T6
Sellamiento	Tapas de protección y juntas, sistema de compensación de presión
Peso	390 g
Garantía	5 años

Nota: adaptado de (SCHMIDT)

Figura 23. Dinamo SON Delux



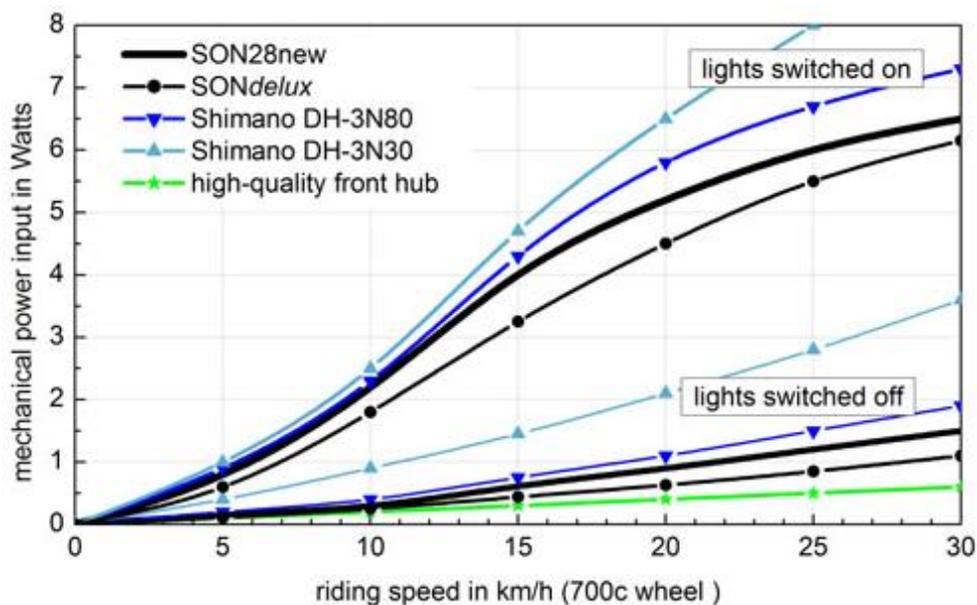
Nota: adaptado de (SCHMIDT)

En pruebas realizadas por el fabricante en las que se prueba el equipo con carga eléctrica y sin carga (para ver los efectos en el torque del dinamo), el SON Delux apenas ofrece resistencia al pedalear con las luces apagadas, como se observa en la Figura 24. La línea inferior indica la resistencia que ofrece una bicicleta sin dinamo. Sobre esa línea se observan las diferentes dinamos de ambas marcas (Schmidt y Shimano). Cuando las luces se encienden, las diferencias en la resistencia generada se acortan, sin embargo aún la SON Delux tiene un mejor comportamiento, al generar menos resistencia mecánica a medida que aumenta la velocidad.

Las pérdidas sin carga (luz apagada) decrecen cuando se compara el SON Delux con el SON 28 en un 30-35%. Con la luz encendida, al usar el SON Delux permite ahorrar alrededor de 1 W de potencia de transmisión. El SON Delux y el SON 28 cuentan con

la misma calidad de acabado, pero para el caso presentado es preferible el SON Delux por tener menor peso.

Figura 24. Consumo de energía de dinamos con luz apagada y encendida



Nota: adaptado de (SCHMIDT)

La desventaja más alta que presenta el dinamo SON Delux es que, a pesar de que no genera mucha resistencia cuando se pedalea con luces apagadas (sin carga), el torque necesario para moverlo (torque inicial) es relativamente alto (0.1 N.m) para ser superado por el sistema diseñado (de baja velocidad de rotación), esto podría traer problemas a la hora de iniciar la generación de energía a partir de velocidades de viento bajas.

Para solucionar este problema, se debe diseñar un sistema de transmisión que permita la reducción de torque en el dinamo, de modo que el movimiento del sistema tenga la suficiente fuerza para superar el torque inicial.

Adicionalmente, con el fin de que el dinamo pueda mantener una constante generación de energía (sea para cargar algún instrumento o para encender luminarias), es importante adicionar al sistema un rectificador y regulador. Para esto se incorporará el sistema de carga y la batería *E-Werk* (ver Figura 25) de la marca *Busch & Müller*, que controla voltajes entre 2.8 a 13.3 V y corriente de 0.1 a 1.5 A y provee potencia de hasta 16 W. Este sistema de batería adicionalmente trae un conjunto de cables que permite conectar los diferentes equipos a cargar al dinamo. Este es el

sistema a usar puesto que se recomienda por el mismo fabricante de los dinamos, y normalmente se usa el equipo en conjunto (es decir dinamo y sistema de carga), por lo que se adquirió a través del mismo proveedor en vez de fabricarlo, puesto que esto alargaría el proceso de diseño del aerogenerador.

Figura 25. Sistema de carga E-Werk



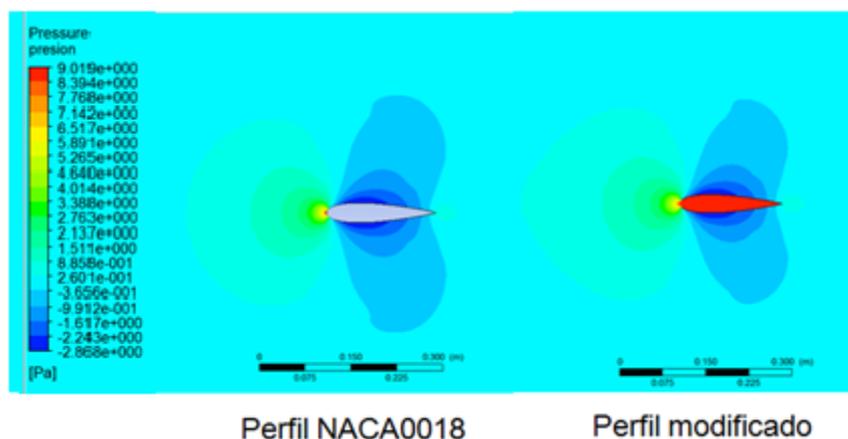
Nota: adaptado de (Peter White Cycles)

5. DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

Para comenzar el proceso de diseño, se realizaron estudios relacionados con el perfil aerodinámico a usar en las palas del aerogenerador (inicialmente tipo Darrieus), con el fin de analizar el proceso de llenado de la estructura (ala inflable) y su comportamiento al estar en movimiento. Para lograr el acercamiento, es necesario conocer el tipo de perfiles usados comúnmente en parapentes y alas inflables, que normalmente son perfiles aerodinámicos convencionales abiertos en el borde de ataque para permitir el llenado de aire y conseguir una presión interna, logrando el funcionamiento del ala. Estos perfiles generalmente son simétricos, y se hacen modificaciones a la estructura para alcanzar la maniobrabilidad del equipo (adicionar alerones o controles dentro del ala).

En una primera instancia se realizó un análisis computacional del comportamiento de un perfil aerodinámico simétrico (NACA 0018) abierto en el borde de ataque (ver ANEXO B y figura 26), éste fue el primer acercamiento al estudio del comportamiento de un aerogenerador de eje vertical portátil que utiliza el concepto de ala inflable en el diseño de sus aspas. En la figura se observa que a un ángulo de ataque de 0° , el perfil modificado tiene un comportamiento similar al perfil original en cuanto a la distribución de presiones a su alrededor.

Figura 26. Contorno de presiones perfil NACA 0018 original y modificado



Se realizó el análisis mediante CFD del perfil enfrentado al viento a 3 ángulos de ataque (0° , 5° y 10°) y a velocidad del viento de 3 m/s. El propósito era observar el proceso de llenado de aire dentro del perfil para verificar el arrastre generado durante

este momento, que es crítico para el buen funcionamiento del diseño, de modo que el valor del arrastre generado no supere la fuerza del aspa y ésta logre avanzar en la dirección adecuada y girar en el sentido correcto.

Se observó que el perfil genera sustentación, lo cual lo hace óptimo para ser utilizado en las aspas de un VAWT, sin embargo, al ser un perfil simétrico, debe haber un ángulo de ataque positivo, para lograr sustentación positiva constante. En las simulaciones, durante el llenado del perfil se observó que inicialmente el arrastre crece rápidamente, para luego disminuir gradualmente hasta alcanzar el arrastre de un perfil cerrado (todo el menos de 0,1 segundo). Sin embargo, este arrastre inicial puede afectar el sentido de rotación del aerogenerador si la fuerza de sustentación no es suficiente para romper la inercia que lo mantiene estático.

A partir de lo anterior se tiene en cuenta que es fundamental asegurarse de que las aspas del aerogenerador enfrenten al viento con un ángulo de ataque mayor a 0° y menor a 10° (rango en que el coeficiente de sustentación del perfil es creciente), de modo que la sustentación del perfil sea positiva, y que la rotación se inicie en sentido correcto y las aspas se llenen adecuadamente, al enfrentar directamente el viento.

Es importante adicionar que los valores del coeficiente de arrastre (C_d) al compararse con valores teóricos presentan un error superior al 20% (ver Tabla 7), aunque los valores del coeficiente de sustentación (C_l) se encuentran en rangos de error aceptables (menor al 12%). Estos resultados del coeficiente de arrastre no son aceptables, y podría significar que las simulaciones fueron realizadas bajo parámetros incorrectos o que realmente el arrastre generado por el perfil en el momento de llenado supera al arrastre teórico. Sin embargo, esto fue un acercamiento a definir que posiblemente el aerogenerador tipo Darrieus no funcionaría.

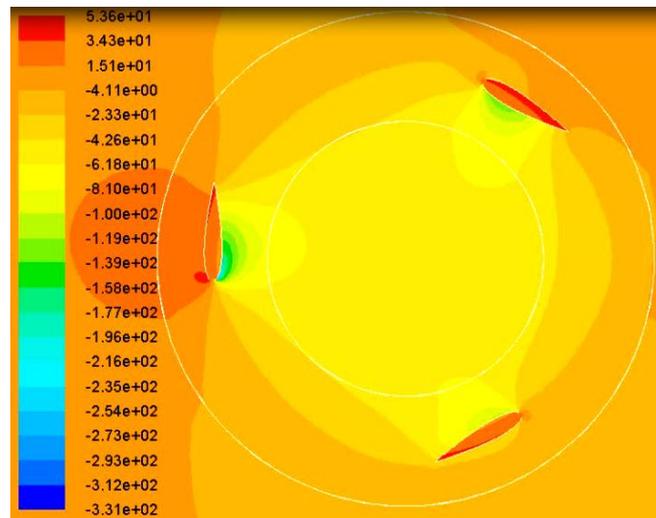
Tabla 7. Comparación de resultados entre el perfil NACA 0018 original y modificado

perfil	α	C_l	%e C_l	C_d	%e C_d
modificado	0°	0,00595	11,425	0,0689	56,257
original		0,00534		0,1576	
modificado	5°	0,486	1,039	0,098	44,745
original		0,491		0,177	
modificado	10°	0,9006	3,099	0,1802	23,266
original		0,929		0,235	

Teniendo en cuenta que el material principal de fabricación del aerogenerador es tela, resulta complejo controlar el ángulo de ataque de las palas. Partiendo de esto, se empezó a considerar la posibilidad de realizar un cambio estructural que permitiera mejorar las condiciones de operación, entre estos cambios estaba la posibilidad de un cambio de estructura principal y por lo tanto, cambio de metodología de trabajo.

En una segunda etapa de estudio se realizó el análisis computacional del comportamiento de tres perfiles NACA 0018 abiertos en el borde de ataque (ver ANEXO C y Figura 27), ubicados a 120° con respecto al centro de rotación (en 2 dimensiones), rotando y considerando una velocidad del viento de 3 m/s, con este estudio se logró observar el torque y la potencia generada por el arreglo de perfiles.

Figura 27. Distribución de presiones en el arreglo de perfiles modificados



En los resultados del estudio se obtuvieron valores negativos de torque (como se observa en la Figura 28), que podrían ser justificados, puesto que se conoce que para los aerogeneradores tipo Darrieus el torque de arranque es cero y a bajos valores de TSR (menores a 1) podría ser negativo, esto se puede concluir al observar detalladamente la Figura 29, en la que el valor de C_p para el aerogenerador tipo Darrieus solo empieza a crecer a partir de TSR de 1. Esto significa que es necesario un motor para arrancar el rotor, y podría ser un rotor Savonius, que a valores de TSR entre 0 y 2 alcanza su valor de C_p máximo (ver Figura 29). Los valores negativos de torque podrían significar también que el aerogenerador rotará en sentido contrario al establecido, debido al arrastre generado en el momento de llenado del perfil, que puede superar la fuerza del aspa.

Figura 28. Cp vs Time.

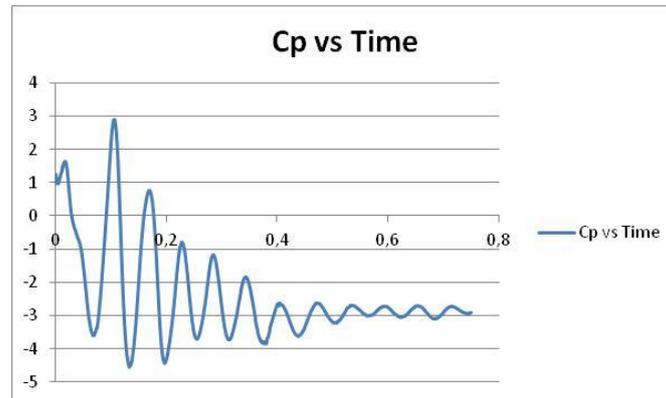
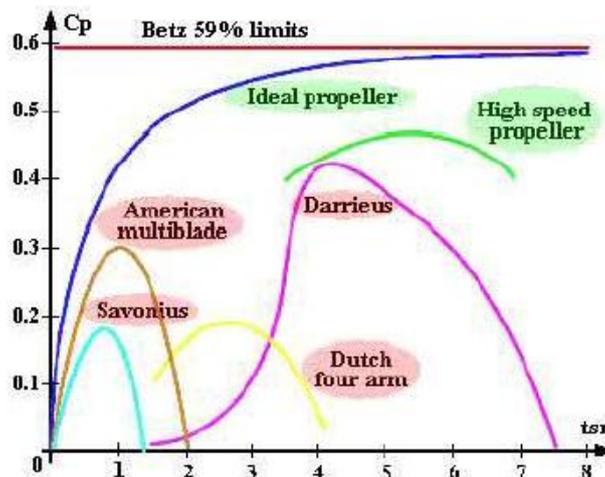


Figura 29. Grafica del TSR Vs. Cp, para diferentes aerogeneradores.



Nota: adaptado de (Other Power)

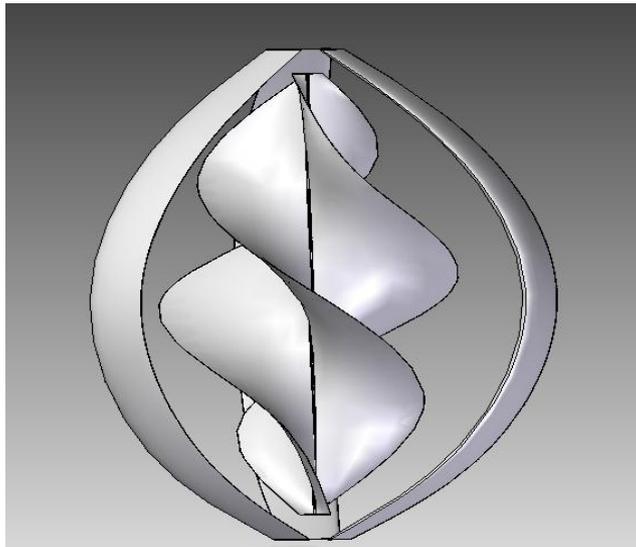
Al usar un perfil de alto espesor como éste (denotado por el nombre NACA 0018, es decir, un espesor de 18% con respecto a la cuerda del perfil), y a un número de Reynolds bajo (baja cuerda y baja velocidad de viento generando un Reynolds aproximado a 37000), se obtienen valores más altos del mínimo C_d/C_l que los obtenidos con perfiles delgados, teniendo una influencia negativa en el valor del C_p , es decir, genera valores de arrastre altos. Debido a este efecto, los rotores Darrieus sólo tienen un C_p aceptable a baja velocidad si son lo suficientemente grandes, es decir, la inercia del movimiento puede ser lo suficientemente alta para vencer el arrastre generado.

Por lo anterior, y por los requerimientos del diseño, se concluye que las características de portabilidad que se pretenden buscar no se adaptarían a las prestaciones que ofrece un aerogenerador tipo Darrieus, puesto que necesita ser de un tamaño y robustez suficientes para vencer el arrastre generado por las palas. Como lo que se busca diseñar y desarrollar es un aerogenerador portable, el tamaño y el peso bajos son el principal criterio para la selección de la estructura, y nuevamente se llega al punto de un posible cambio en el diseño de la estructura.

En la búsqueda de posibles soluciones a los problemas mencionados, se consideró el estudio de un aerogenerador tipo Savonius, el cual se analizó desde dos posibles diseños:

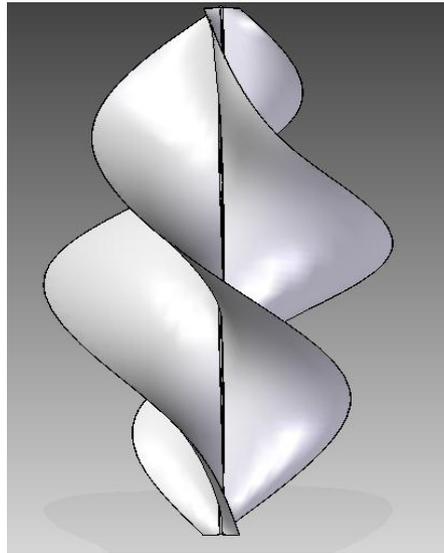
- Servir como un motor inicial para el aerogenerador tipo Darrieus diseñado inicialmente, permitiendo la eliminación del torque negativo que se genera al inicio del movimiento (ver diseño en Figura 30).

Figura 30. Aerogenerador Savonius-Darrieus



- Ser la estructura principal del aerogenerador, es decir sólo tipo Savonius (ver diseño en Figura 31 y planos de prototipo en Anexo E).

Figura 31. Aerogenerador tipo Savonius



Con el fin de seleccionar la estructura más adecuada para el aerogenerador, se realizaron estudios computacionales de ambas opciones (rotor Savonius y rotor Savonius-Darrieus), comparando el torque generado a diferentes velocidades (cuyos resultados se encuentran en el numeral 7. Análisis de diseño).

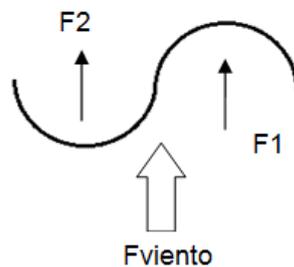
Posteriormente se realizaron pruebas de campo de ambos modelos, con el fin de seleccionar el más adecuado para la aplicación en campamentos transitorios (resultados en el numeral 8. Validación de diseño).

Utilizando una herramienta de CAD (*Computer Aided Design*) (*SolidEdge* en nuestro caso, ver planos del prototipo funcional en el Anexo E) para la generación de la geometría, se realizaron los diseños, teniendo en cuenta las dos posibles soluciones mencionadas anteriormente. Las dimensiones para el prototipo 1 (Savonius mostrado en la Figura 30) son 90 cm de alto y 30 cm de radio. Las dimensiones para el prototipo 2 (Savonius-Darrieus mostrado en la Figura 31) son 120 cm de alto y 40 cm de radio.

6. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Para el análisis estructural se realiza una idealización de la estructura (con sólo dos aspas) con el fin de calcular la fuerza del viento a una velocidad a la que se considera que el aerogenerador sufrirá deformaciones y por lo tanto disminuirá su capacidad de generación, para este análisis se consideró una velocidad del viento de 15 m/s, la cual según la clasificación del viento es considerado como fuerte. Este valor del viento es debido a que el rango en el cual se busca que el aerogenerador opere se encuentra entre viento ligero y fresco (debajo del valor escogido), por lo que en condiciones normales de operación, se espera que la deformación a calcular sea extrema. Este análisis se lleva a cabo con el fin de verificar la deformación máxima que tendrá el eje y evitar posibles daños estructurales a grandes velocidades del viento. La estructura del aerogenerador idealizada (vista desde arriba) se observa en la Figura 32.

Figura 32. Estructura idealizada y diagrama de fuerzas



Para calcular la fuerza ejercida sobre la geometría, se utilizan las ecuaciones 3 y 4 (presentadas en el numeral 1.10), de modo que:

$$F_{viento} = F_1 + F_2$$

$$\lambda = 0,8 = \frac{\Omega * 0,3}{15}$$

$$\Omega = 40 \text{ rad/s}$$

Para calcular la fuerza ejercida sobre cada cara, se tiene en cuenta el valor del coeficiente de arrastre específico (C_d) para media circunferencia cóncava o convexa, que son valores teóricos, teniendo:

$$C_{d1}=2.3 \quad \text{y} \quad C_{d2}=1.2$$

Teniendo en cuenta los anteriores datos se solucionó la ecuación para despejar la fuerza del viento (en función de la velocidad V) ejercida sobre el aerogenerador, así:

$$F_{viento} = \frac{1}{2} \rho A [C_{d1} * (V \pm \Omega * R)^2 + C_{d2} * (V \mp \Omega * R)^2] \cong 329.09 \text{ N}$$

Donde:

$$\rho = 1.225 \text{ Kg/m}^3$$

$$A = 0.6 \text{ m}^2$$

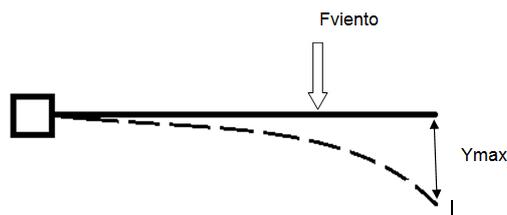
$$V = 15 \text{ m/s}$$

$$R = 0.3 \text{ m}$$

$$\Omega = 40 \text{ rad/seg}$$

Seguidamente se hace un análisis estructural del eje empotrado en un extremo, con una fuerza aplicada transversalmente (F_{viento}), lo que genera un pandeo. Se busca identificar la deformación máxima (Y_{max}) del eje de fibra de vidrio (con módulo de elasticidad $E=12,6 \times 10^6 \text{ psi} = 86,8 \text{ GPa}$) como se muestra en la Figura 33.

Figura 33. Diagrama de fuerza sobre el eje



Para conocer el valor de la deformación máxima que tendrá el eje se utiliza la ecuación:

$$Y_{max} = \frac{5 * F * L^3}{48 * E * I} \cong 0.06 \text{ m}$$

Donde:

F: Fuerza sobre el eje 329.09 N

L: Longitud del eje (1m)

E: Módulo de elasticidad (86,8 GPa)

Además, para un eje hueco se considera la siguiente ecuación:

$$I = \frac{\pi}{4} * (r_2^4 - r_1^4) = 5 \times 10^{-9} m^4$$

Donde:

I: Momento de inercia (m^4)

r_2 : radio exterior = 0.01 m

r_1 : radio interior = 0.007 m

Se puede concluir entonces que a velocidades de viento mayores a la de diseño, la deformación del eje sería aproximadamente de 6 cm, y como el sistema tiende a vibrar, esta deformación podría causar fatiga al material y posteriormente su falla. Por lo tanto, se recomienda emplazar el aerogenerador en lugares donde la velocidad del viento no supere los 7.5 m/s (para dar un factor de seguridad de 2 al sistema con respecto a la deformación máxima), con el fin de prevenir problemas estructurales por vibración y fatiga.

También es importante definir la transmisión de potencia entre el eje del aerogenerador y el dinamo, para lo cual se definió una configuración de poleas unidas por una correa sin tener en cuenta efectos de fricción. Para encontrar una transmisión eficiente entre las poleas, se analizó el ángulo de contacto, para esto se utilizó la siguiente ecuación:

$$\theta d = \pi - 2 \sin^{-1} \frac{D - d}{2c} = 180^\circ$$

Donde:

θd : ángulo de contacto ($^\circ$)

D: diámetro mayor (40 mm)

d: diámetro menor (40 mm)

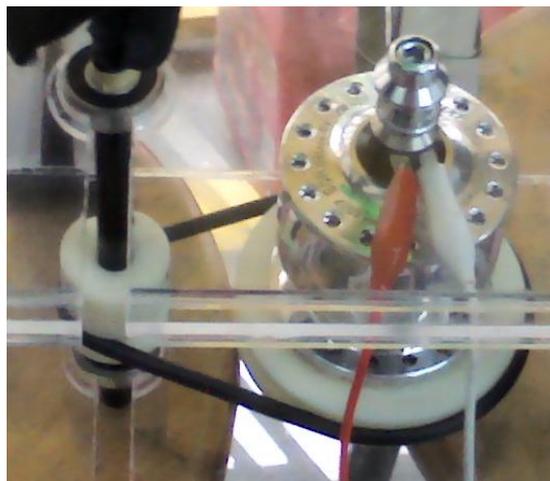
c: distancia ente los centros (75 mm)

Teniendo en cuenta el anterior resultado se asegura una relación 1:1 entre poleas y que las tensiones en el sistema sean iguales.

Debido al alto torque que es necesario vencer para dar movimiento a el dinamo, fue necesario mejorar la ventaja mecánica, aumentando el diámetro de la polea acoplada al dinamo a 83 mm, logrando así, vencer el torque que se genera justo antes de que se inicie el movimiento de rotación.

Así mismo, se realiza una reducción en el diámetro del eje motriz acoplado al aerogenerador a 30 mm (asegurando una relación 1:3, mostrado en la Figura 34), para que al igual que en los sistemas de bicicletas se reduzca el trabajo realizado por el aerogenerador, que finalmente va a mover el sistema, consiguiendo disminuir el número de revoluciones por minuto de el dinamo.

Figura 34. Relación de poleas



Para esto se tuvo en cuenta la ecuación de relación de transmisión, como se muestra a continuación:

$$i = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\phi_1}{\phi_2}$$

Donde:

i : relación de potencia

n_1 : velocidad de giro de la polea motriz

n_2 : velocidad de giro de la polea conducida

\emptyset_1 : diámetro polea motriz (30 mm)

\emptyset_2 : diámetro polea conducida (83 mm)

Remplazando los valores en la ecuación nos queda que:

$$i = \frac{30}{83} = 0.36$$

Al valor de 83 mm para la polea acoplada al dinamo principalmente se llegó por comodidad de diseño, esto debido a que se construyó la caja donde va acoplado este sistema, considerando las dimensiones del dinamo más no las posibles dimensiones del sistema de transmisión, por lo cual esta relación es la máxima que se puede introducir en la caja.

Si la relación de transmisión se aumenta, es decir 1:5 o más, es posible que se logre un mejor resultado en cuanto a la disminución del torque del dinamo, por lo tanto aumente su capacidad de generación, sin embargo, esto implicaría la construcción de poleas de transmisión de mayor tamaño, significando esto un incremento de peso dentro del sistema, y por lo tanto el aerogenerador (acoplado a la polea motriz) debe realizar mayora trabajo para suplir esta condición, lo que se traduce en pérdida de eficiencia, y si por el contrario, para alcanzar la relación de transmisión adecuada se disminuye el tamaño de las poleas, significaría una pérdida en la ventaja mecánica.

7. ANÁLISIS DE DISEÑO

Para hacer un análisis de la estructura diseñada, se realizaron simulaciones mediante mecánica de fluidos computacional (CFD, con el software Ansys Fluent). Las simulaciones realizadas corresponden al comportamiento del rotor a diferentes velocidades, buscando la estabilidad del sistema y comparando el torque generado con el torque inicial de el dinamo, con el fin de encontrar la velocidad mínima de operación.

Para las simulaciones se usaron las geometrías mostradas en el numeral 5 (Savonius y Savonius-Darrieus) aunque la geometría del aerogenerador compuesto se simuló con las palas del Darrieus cerradas en el borde de ataque, de modo que actuaran como alas normales, y no como alas inflables. Esta decisión se tomó después de intentar mallar las palas con el borde de ataque abierto y bajo espesor en las paredes, no existió convergencia de malla a pesar de los intentos y cambios de metodología de mallado (tamaño, cantidad y forma de elementos, estructura de la malla y transición entre otros). Finalmente para ambos modelos se usó una malla no estructurada basada en tetraedros y los parámetros de la simulación fueron:

En “General”, se trabajó con el modelo basado en presión, este modelo es usado para flujos incompresibles y medianamente compresibles. Se seleccionó una velocidad de formulación absoluta, puesto que normalmente se usa cuando se trabajan con bajas magnitudes de velocidad, y se trabajó en estado transitorio para un modelo en 3D.

En “Models”, se utilizó un modelo de viscosidad k-omega SST (*Shear Stress Transport*), mismo que se usó en simulaciones anteriores, por su buen comportamiento cuando hay separación de flujo y puede ser usado como un modelo de bajo Reynolds sin necesidad de gran amortiguación, además, aunque produce niveles de turbulencia en regiones como las de estancamiento y regiones con una fuerte aceleración, este comportamiento es menos pronunciado que con un modelo normal de k-épsilon

En “Cell Zone Conditions”, se creó la malla móvil y se agregó la velocidad rotacional que tiene el aerogenerador (8 rad/seg), conociendo una velocidad de viento de 3m/seg

y un radio de 0.3m. En “*Boundary Conditions*” se ingresó la velocidad del viento, en dirección X y se crearon las interfaces.

En “*Reference Values*”, se consideraron los parámetros por defecto, y finalmente se seleccionó el método de solución (“*Solution Method*”), en Scheme se seleccionó SIMPLE, que aunque normalmente es usada para simulaciones en estado estacionario, se usaron *time-step* pequeños, por lo cual PISO podría significar un incremento computacional innecesario. En *Gradient* se usó *Green Gauss node based* que tiende a ser más exacto que el esquema *cell-based* para el tipo de malla usada. En *Pressure* se usó el esquema PRESTO! Recomendado para flujos con componentes rotacionales, por último se trabajó con *First order upwind* para el *Momentum, Turbulent kinetic energy, Specific dissipation rate y Transient formulation*, debido a que permite mejor convergencia, aunque los resultados pueden ser menos precisos.

7.1 Rotor Savonius

Para el rotor Savonius el diseño se basó en el concepto de “tornillo de Arquímedes”, conocido también como “tornillo sinfín”. Partiendo de este concepto, se encontraron diseños de cometas decorativas con auto rotación, como la que se ve en la Figura 35.

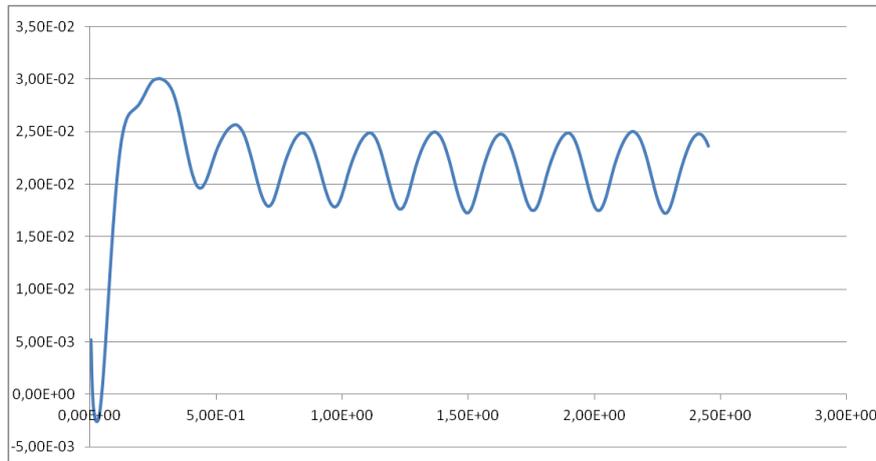
Figura 35. Cometa decorativa en forma de tornillo sinfín



Nota: adaptado de (JanClaes)

Se analizó inicialmente a una velocidad del viento de 3 m/s, con el fin de verificar su estabilidad y torque generado (positivo), y como se observa en la Figura 36, después de lograr la estabilidad del sistema (0.5 segundos), el rotor alcanza a generar energía con un coeficiente de potencia (C_p) de 0.025 (valor máximo), es decir, que convierte el 2.5% de la energía disponible del viento en potencia. Este valor se tomará como valor teórico de coeficiente de potencia para el aerogenerador tipo Savonius.

Figura 36. Cp vs Tiempo (rotor Savonius)



Teniendo en cuenta la energía disponible, calculada usando la ecuación 1 (nombrada en el numeral 1.4) ($P_d=9.9225$ W), a una velocidad de viento de 3 m/s y tomando el área transversal del rotor como rectangular (0.6 m²), entonces el valor teórico de potencia que el aerogenerador está en capacidad de generar es 0.248 W.

Se observa que a pesar de que la energía disponible del viento es de casi 10 W, teóricamente el aerogenerador apenas es capaz de generar alrededor de 250 mW, esto podría ser debido a velocidad de rotación del dispositivo (alrededor de 8 rad/seg). Además, según los datos vistos en la Figura 29, el máximo valor de Cp de un aerogenerador tipo Savonius es alrededor de 0,15 (generación de alrededor de 1 W), teniendo en cuenta que es el valor para un aerogenerador Savonius típico (palas cóncavas y convexas unidas a un eje central). Es decir, el error entre el valor obtenido en la simulación y el teórico es superior al 80%, por lo que los resultados no pueden ser validados hasta hacer las pruebas de campo que muestren valores reales para el prototipo construido.

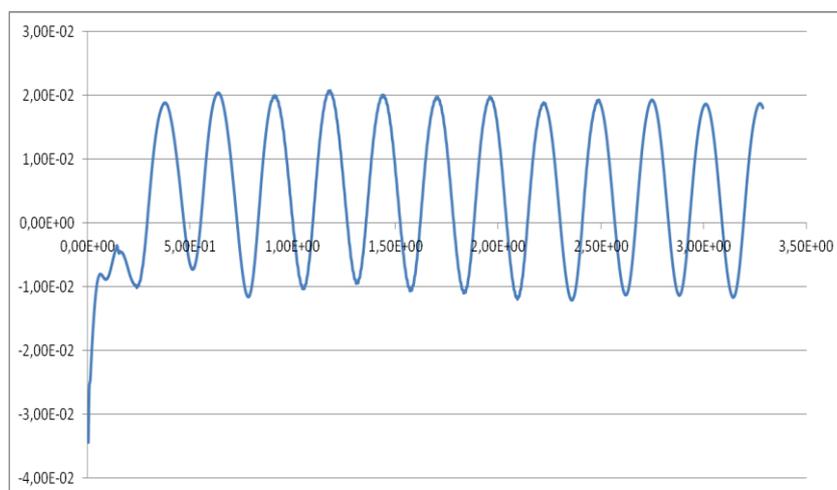
7.2 Rotor Savonius-Darrieus

Seguidamente se realizaron simulaciones y estudios sobre la geometría del rotor Savonius-Darrieus (bajo los mismos parámetros de la simulación mencionados al principio del numeral), con el fin de verificar la operación del aerogenerador Savonius con la influencia del aerogenerador Darrieus.

También se analizó inicialmente a una velocidad del viento de 3 m/s, y como se observa en la Figura 37, después de lograr la estabilidad del sistema, de manera similar que el modelo anterior (0.5 segundos), el rotor alcanza a generar energía con

un coeficiente de potencia (C_p) de 0.02 (valor máximo), es decir, que convierte el 2% de la energía disponible del viento en potencia, este valor se consideró poco lógico puesto que normalmente los aerogeneradores tipo Darrieus tienen mayor eficiencia que los Savonius después de lograr la estabilidad. Se realizó un análisis posterior a la simulación y se observó que el torque generado por el sistema de los dos generadores es negativo, es decir, posiblemente este diseño tiende a girar en la dirección contraria a la de diseño, y por tal motivo se aprovecha menos la energía disponible.

Figura 37. C_p vs Tiempo (rotor Savonius-Darrieus)



Con los datos obtenidos en el post de Ansys Fluent, se observó que el valor del torque es de -0.1432 N.m , que para la velocidad de operación (6 rad/s) corresponde a una potencia de $0,859 \text{ W}$, es decir, con respecto a la potencia disponible de 15.876 W (para velocidad 3 m/s y área 0.96 m^2 que corresponde a las dimensiones de 1.2 m de alto y 0.4 m de radio), el C_p es de 0.054 lo que indica que el rotor Savonius-Darrieus aprovecha el 5.4% de la energía disponible, generando 0.859 W de potencia, 3 veces mayor a la generada por el rotor Savonius, sin embargo con un posible error de diseño en cuanto al sentido de rotación del sistema.

Se realizaron unos cálculos del mismo modo que los anteriores, suponiendo que se mantienen las mismas dimensiones que para el rotor Savonius (1 m de altura y 0.3 m de radio), el aprovechamiento de la energía del rotor Savonius-Darrieus sigue siendo comparablemente mayor, puesto que para una potencia disponible de 9.9225 W (que ya se había calculado para el modelo Savonius), se obtiene un C_p de 0.115 . Es decir, el rotor Savonius-Darrieus aprovecharía el 11.5% de la energía de viento disponible teóricamente, según la simulación.

Nuevamente, si se toma como valor teórico un C_p de 0,15 (que es el del rotor Savonius, tomando el más bajo como teórico puesto que el C_p máximo teórico del Darrieus es de 0,4), el error se disminuiría al 23%, sin embargo sigue siendo un resultado no válido hasta que se hagan pruebas reales del prototipo de este tamaño.

Estos acercamientos llevan a pensar que si se mantienen las dimensiones, posiblemente el rotor Savonius-Darrieus tenga una eficiencia mayor al Savonius, sin embargo necesitaría de velocidades de viento mayores para su correcta operación. Si se aumenta el tamaño del rotor Savonius-Darrieus, se generaría mayor potencia a la misma velocidad del Savonius, aunque la eficiencia sea menor.

7.3 Comparación

Finalmente se realizaron simulaciones en CFD en estado estacionario (se utilizaron los mismos parámetros de las simulaciones transitorias) de ambas geometrías (del mismo tamaño: 1 m de alto y 0.3 m de radio) con el fin de comparar el torque generado, teniendo en cuenta una idealización de la geometría, es decir, que las palas del Savonius logran una geometría cóncava y convexa, aprovechando adecuadamente la energía del viento y las palas del Darrieus son cerradas en el borde de ataque. Este torque inicial es importante puesto que debe ser mayor al torque de arranque del dinamo (0.1 N.m), de modo que se logre moverlo generar energía suficiente para cargar sistemas de comunicación básicos o luminarias tipo led.

Tabla 8. Comparación de Torque a diferentes velocidades

Velocidad (m/s)	Torque (N.m)	
	Savonius	Savonius-Darrieus
2	-	0,05213056
3	0,02951955	0,1160085
4	0,06791363	0,25460186
5	0,1112515	-
8	0,30834034	-

Como se observa en la Tabla 8, el rotor Savonius-Darrieus tiene la capacidad de mover el dinamo a velocidades más bajas que el rotor Savonius (3 m/s y 5 m/s respectivamente), demostrando que su capacidad de generación podría ser mayor, siendo una alta ventaja comparativa a la hora del funcionamiento de ambos modelos, puesto que necesitaría velocidad de viento menor para empezar a generar energía eléctrica.

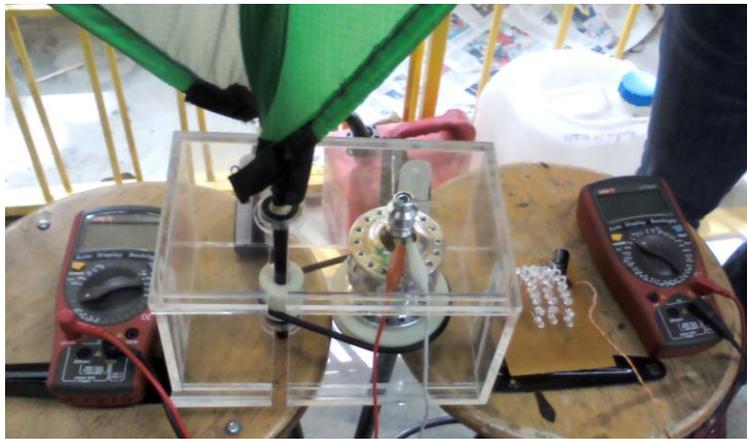
Se observa que las velocidades mínimas de operación serían en su orden 3 m/s para el rotor Savonius-Darrieus y 5 m/s para el rotor Savonius. Estos análisis llevaron a la selección del diseño de rotor tipo Savonius-Darrieus como la posible mejor opción para el aerogenerador final, sin embargo, es importante hacer pruebas de campo (o de laboratorio) a ambos modelos con el fin de validar los datos generados, puesto que las diferencias entre las geometrías de diseño y las teóricas influyen altamente en el porcentaje de error, para así finalmente seleccionar el diseño que presente un mejor comportamiento frente a las condiciones de viento de diferentes lugares y los requerimientos de potencia.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que los aerogeneradores tipo Savonius, por su diseño tienen una eficiencia muy baja con respecto a los Darrieus (como se vio en los valores teóricos presentados), es decir C_p normalmente alrededor de 0.15, y al combinarlo con el tipo Darrieus se podrían generar problemas netamente estructurales, debido a la complejidad aerodinámica del Darrieus. La probabilidad de que el prototipo Savonius-Darrieus no funcione es alta, e incluso desde las simulaciones iniciales se vieron problemas en la concepción de este diseño, los problemas se deben a que la construcción de un aerogenerador tipo Darrieus debe ser muy precisa para lograr su máxima capacidad de operación, es decir un C_p de alrededor de 0.4, y al combinarlo con el Savonius, la eficiencia se reduciría a más de la mitad.

8. VALIDACIÓN DE DISEÑO

Se realizaron pruebas de laboratorio para lograr la caracterización de cada rotor, para esto se utilizó la salida del túnel de viento y equipos básicos de medición como tacómetro, voltímetro y anemómetro para tomar los datos necesarios y posteriormente realizar las gráficas correspondientes a velocidad del viento contra potencia entregada por el generador y velocidad de rotación. El montaje que se utilizó se observa en la Figura 38.

Figura 38. Montaje y equipos utilizados



Se utilizaron dos voltímetros para medir simultáneamente voltaje y corriente en la carga (conjunto de luminarias tipo led en serie y paralelo), un tacómetro para conocer la velocidad de rotación del eje y un anemómetro para medir la velocidad del viento a la salida del túnel de viento. Aunque el flujo no es uniforme en esta etapa del túnel, se utilizó un cono para direccionarlo, además se trabajó a diferentes velocidades de viento, cambiando la potencia del túnel con el fin de realizar las gráficas de caracterización del aerogenerador.

Otra característica de las pruebas importante es que el sistema se comporta diferente si se tiene conectada carga eléctrica (luminarias tipo led) o si está girando sin carga, esto se debe a que a medida que aumenta la carga eléctrica, el dinamo aumenta su capacidad de generación, por lo que los imanes y bobinas que lo componen aumentan la transmisión de corriente, generando electromagnetismo que aumenta el torque del dinamo.

8.1 Rotor Savonius

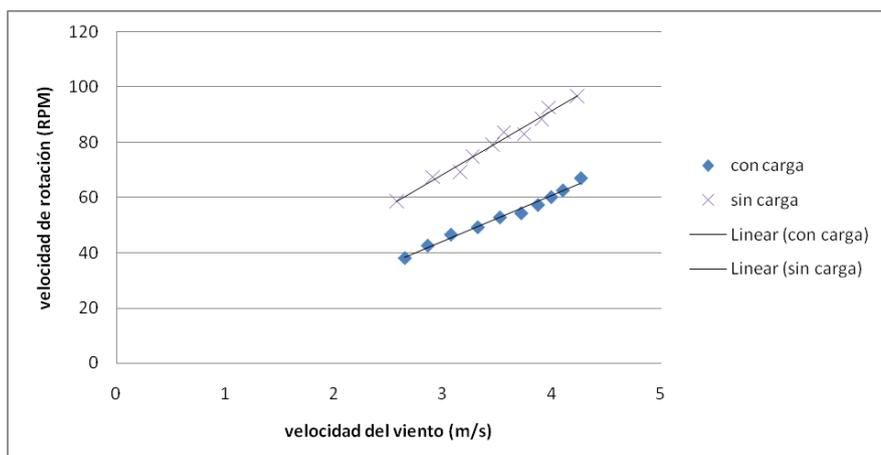
El primer modelo que se construyó fue un rotor Savonius de radio 30 cm, que se muestra en la Figura 39. Al realizar la prueba del rotor se tuvo en cuenta el principio de funcionamiento del tornillo de Arquímedes (combinando fuerzas de sustentación y arrastre). Además, como el prototipo no se construyó con concavidad en las palas, el aerogenerador podría girar en cualquier dirección, puesto que la fuerza que se genera entre una y otra es la misma en ambas direcciones de giro.

Figura 39. Prototipo de aerogenerador tipo Savonius de radio 30 cm



En la Figura 40 se observa que a medida que la velocidad del viento aumenta, de igual forma aumenta la velocidad de rotación del aerogenerador cuando no se aplica ninguna carga eléctrica alcanzando valores cercanos a 100 RPMs cuando la velocidad del viento es superior a 4 m/s, esto es debido a que el dinamo mantiene su torque constante. La gráfica de la Figura 40 es el resultado de un promedio entre tres pruebas realizadas bajo los mismos parámetros.

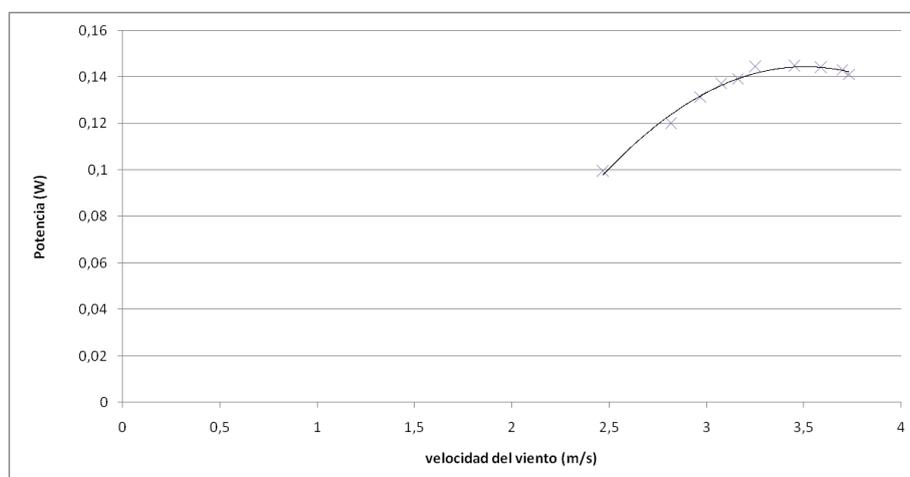
Figura 40. Velocidad del viento vs Velocidad de rotación



Así mismo, de la Figura 40 se puede observar lo que sucede en el sistema cuando se aplica una carga eléctrica, en este caso, la velocidad de rotación máxima está limitada por el aumento de torque del dinamo, llegando apenas a valores de rotación de 67 RPMs con velocidad del viento superior a 4 m/s, es decir una reducción de alrededor de 33% con respecto a las RPMs generadas sin aplicar carga.

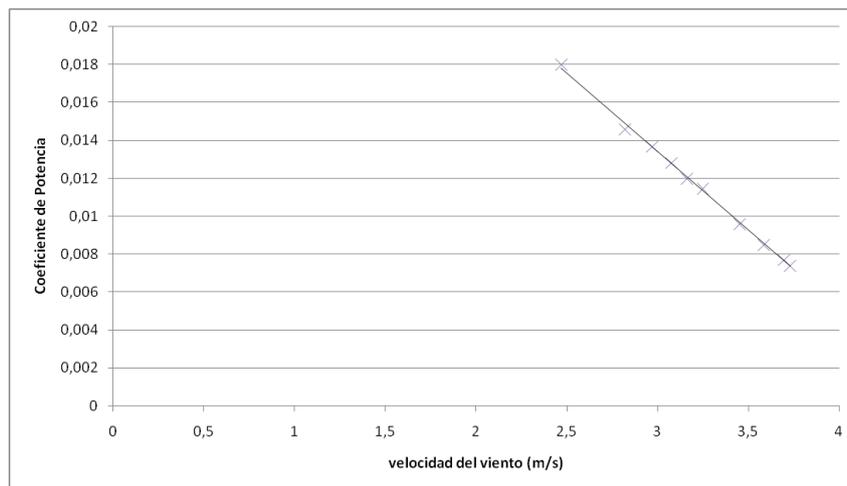
En la Figura 41, se presenta el resultado de las pruebas de potencia entregada. Se observa que la curva obtenida es similar a las presentadas en el marco teórico. Durante esta prueba el aerogenerador comienza su operación a una velocidad de viento de 2.5 m/s con carga aplicada, llegando a un máximo de 0.15 W a una velocidad de 3.25 m/s, logrando cierta estabilidad y posteriormente llegando a un punto de corte alrededor de los 4 m/s.

Figura 41. Velocidad del viento vs Potencia entregada



Al analizar la potencia entregada frente a la potencia disponible del viento a las mismas velocidades que se realizaron las pruebas, como se observa en la Figura 42, el máximo coeficiente de potencia (0.018) se da a la velocidad a la que el aerogenerador comienza a generar (2.5 m/s). Este valor no concuerda con el obtenido en la simulación del rotor Savonius (0.025) para una velocidad de 3 m/s (error del 28%). Este porcentaje de error no es válido considerando que está por encima del 20%, esto puede deberse a diferentes factores como la falta de concavidad en las palas del prototipo, lo cual es un diferencial frente a la simulación, sin embargo el comportamiento del coeficiente de potencia es normal, puesto que después de llegar al máximo aprovechamiento de la energía, el aerogenerador puede inducir pérdidas por diferentes factores, como puede ser la vibración del sistema a medida que aumenta la velocidad del viento.

Figura 42. Velocidad del viento vs Coeficiente de potencia



8.2 Rotor Savonius-Darrieus

Se construyó un prototipo del rotor Savonius-Darrieus como se puede observar en la Figura 43, combinando el Savonius existente con aspas hechas bajo el principio de ala inflable. En este caso se pretendían realizar las mismas pruebas que se realizaron con el Savonius, con el fin de verificar que el funcionamiento de las alas inflables como componentes de un rotor Darrieus es adecuada. Este prototipo está conformado por un rotor de arranque (Savonius) con un diámetro de 80 cm y un rotor principal (Darrieus), conformado por alas inflables de perfil aerodinámico (NACA 0018) y 15 cm de cuerda.

Figura 43. Prototipo de aerogenerador tipo Savonius-Darrieus



Al ensamblar el prototipo, se observó que éste cuenta con un grave problema estructural. Debido a que al ser un sistema conformado principalmente por tela a tensión y elementos a compresión (fibra de vidrio), su peso se reduce a gramos, cumpliendo uno de los requerimientos de diseño, sin embargo, al no contar con muchos elementos estructurales rígidos, en el momento en el cual el aerogenerador comienza su movimiento de rotación, las alas inflables se colapsan si el viento las enfrenta por el extradós.

El efecto anterior es desfavorable para el buen funcionamiento del rotor, puesto que hace que la estructura se frene y no se logre generar la energía suficiente para cargar equipos básicos. Por esta razón, el prototipo Savonius-Darrieus debe ser rediseñado, de modo que tenga una estructura más rígida y que permita su adecuado funcionamiento. Sin embargo esa modificación no será abarcada en este trabajo.

Debido a lo anterior, se realizó una segunda prueba con el rotor Savonius (de radio 40 cm), el cual se muestra en la Figura 44, con el fin de evidenciar los efectos que tiene el cambio en las dimensiones con respecto al primer prototipo.

Figura 44. Prototipo de aerogenerador tipo Savonius de radio 40 cm

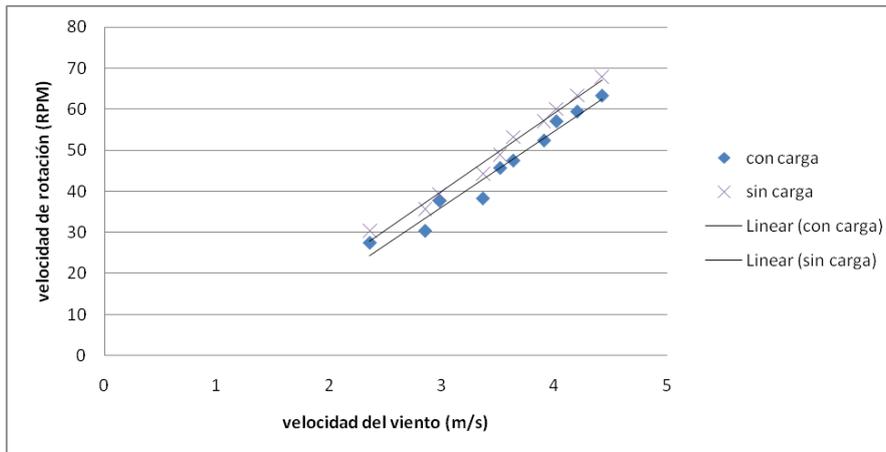


En la Figura 45 se demuestra que a medida que la velocidad del viento aumenta, del mismo modo aumenta la velocidad de rotación del aerogenerador cuando no se aplica ninguna carga eléctrica alcanzando valores cercanos a 70 RPMs con velocidad del viento superior a 4 m/s. La gráfica de la Figura 45 es el resultado de un promedio entre dos pruebas realizadas bajo los mismos parámetros y su comportamiento es similar al prototipo anterior. En esta instancia se realizaron únicamente dos pruebas debido a que los resultados entre una y otra prueba no tenían cambios significativos.

También se presenta en la Figura 45 comportamiento del sistema cuando se le aplica una carga eléctrica, que es similar al comportamiento sin carga, no obstante, en esta prueba la velocidad de rotación máxima está limitada por el aumento de torque de el dinamo como ya se mencionó, llegando apenas a valores de rotación de 62 RPMs con velocidad del viento superior a 4 m/s, es decir una reducción de alrededor de 11% con respecto a las RPMs generadas sin carga aplicada.

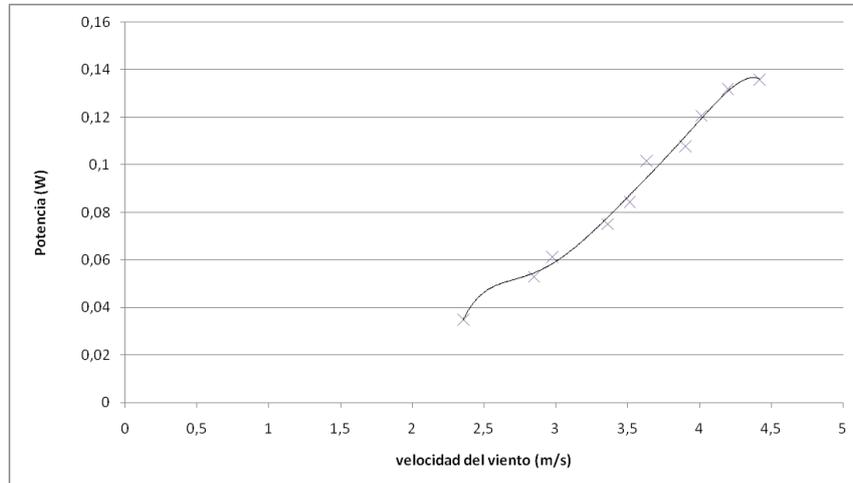
Esta disminución en la velocidad de rotación es menor a la que se evidenció con el primer prototipo, esto puede ser aprovechado para generar más energía si se logra la estabilidad del sistema y la disminución de factores relevantes como la alta vibración inducida al tener un eje de un largo considerable, el cual se encuentra emplazado únicamente en un extremo.

Figura 45. Velocidad del viento vs Velocidad de rotación



En la Figura 46 se muestra el resultado al realizar pruebas de potencia entregada, esta gráfica también es similar a las vistas en el marco teórico. A una velocidad de viento de 2.4 m/s el rotor Savonius comienza su operación con carga aplicada, llegando a un máximo de 0.135 W a una velocidad de 4.42 m/s, con tendencia a estabilizarse y posteriormente disminuir en el momento en donde alcanza su punto de corte.

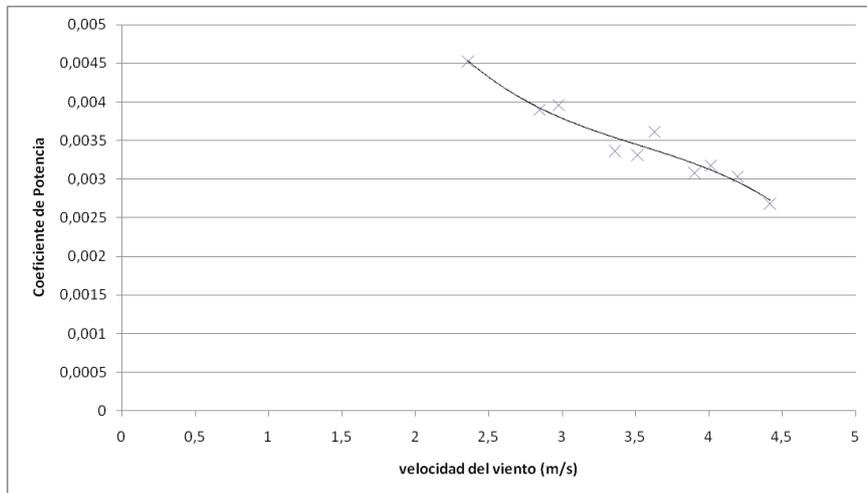
Figura 46. Velocidad del viento vs Potencia entregada



Al analizar la potencia entregada frente a la potencia disponible del viento a las mismas velocidades que se realizaron las pruebas, como se observa en la Figura 7, el máximo coeficiente de potencia (0.0045) se da a la velocidad a la que el aerogenerador comienza a generar (2.5 m/s). Este valor no concuerda con el obtenido en la simulación del rotor Savonius-Darrieus (0.02) para una velocidad de 3 m/s, como se observó en la Figura 37, El error entre los coeficientes de potencia es del 70%, lo cual según los parámetros de validación de resultados se encuentra por fuera de los

límites permitidos, sin embargo, este resultado se debe a que por ser un prototipo de mayor tamaño, las vibraciones inducidas pueden ser mayores.

Figura 47. Velocidad del viento vs Coeficiente de potencia



8.3 Comparación

Al comparar el comportamiento de las dos configuraciones del rotor Savonius, se evidencia que el rotor de radio más pequeño (30 cm de radio) genera valores de potencia y RPM's mayores (11% y 30% de diferencia respectivamente). Esto se debe a diferentes factores, como el momento de inercia del rotor más grande con respecto al pequeño y el nivel de vibraciones alcanzado, puesto que en el prototipo de 40 cm de radio (el cual es más alto), la fuerza ejercida sobre el eje es mayor, y sumado al movimiento de rotación, se alcanza un movimiento oscilatorio indeseado, el cual frena al aerogenerador y por lo tanto se logra generar menos energía eléctrica, lo cual hace ineficiente al sistema.

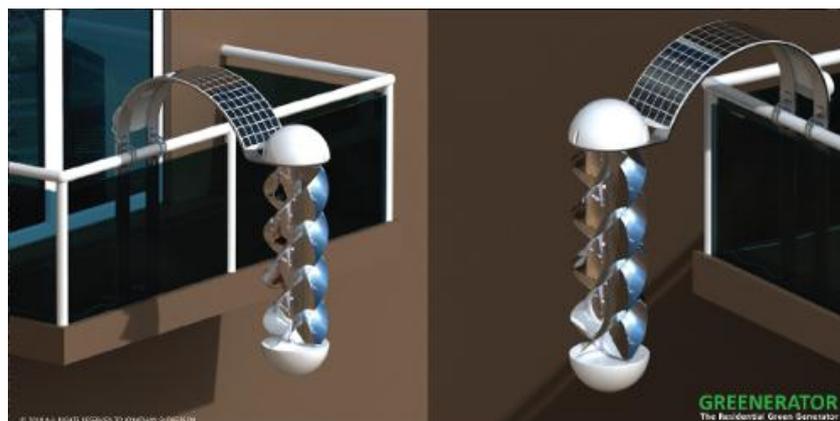
Lo anterior influye directamente en la energía generada, se observa claramente que el error entre los valores de C_p teóricos (obtenidos en la simulación) y obtenidos en la prueba de laboratorio es de alrededor de 27% para el prototipo pequeño y de 70% para el prototipo grande. Teniendo en cuenta que ambos porcentajes de error son muy superiores al valor aceptable, se podría sugerir una reforma estructural buscando dar una mayor rigidez al eje del aerogenerador, para disminuir las vibraciones que producen pérdidas de potencia. Con estas modificaciones se podría pensar que el prototipo pequeño alcanzaría su nivel óptimo de generación según las simulaciones (C_p de 0.02).

9. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL DISEÑO EN EL MERCADO

Actualmente los aerogeneradores portátiles están en etapa de estudio en gran parte del mundo, por lo que la mayoría de equipos existentes se encuentran en condición de prototipo de prueba, tal como el presentado en este trabajo. Sin embargo, las ventajas o desventajas que presente el prototipo mostrado en este trabajo no se pueden tomar como verdaderas aún, mientras el prototipo presente porcentajes de error tan altos, atribuidos principalmente a los problemas estructurales.

De los aerogeneradores mencionados en el numeral 2.4 del presente trabajo, se encuentra que el más acorde para comparar es el Greenerator, debido a que es de eje vertical al igual que el propuesto, además está diseñado para operar a bajas velocidades de viento (1.5 m/s), también tiene la ventaja de usar paneles solares flexibles en su estructura, como se observa en la Figura 48, los fabricantes hablan de capacidad para encender 3 lámparas de 40 W de bajo consumo, sin embargo no está comprobado. En cuanto al peso y al costo, la información no es suficiente puesto que se encuentra en etapa de prototipo.

Figura 48. Aerogenerador Greenerator



Nota: adaptado de (Greenerator, 2011)

Son pocos los aerogeneradores que se encuentran en el mercado actualmente en etapa de comercialización, es por esto que resulta complejo tener certeza de un sistema similar con el cual pueda compararse el prototipo presentado. Algunos de los

aerogeneradores que se encuentra en esta etapa son el Wellsee 400w (ver Figura 49), GudCraft 10W y el ALEKO WGV45W. Los tres son de eje vertical, sin embargo solo el primero opera a bajas velocidades de viento (aunque su potencia máxima se logra con velocidades superiores a 15 m/s), lo cual es una condición similar a la propuesta en el trabajo, además de que por su estructura puede ser emplazado en diferentes lugares. Su mayor desventaja en comparación con el diseño propuesto es el peso (15 Kg), lo que hace que su traslado sea condicionado dependiendo de diferentes situaciones. En cuanto al costo, varía entre 100 a 300 USD más los gastos de envío.

Figura 49. Aerogenerador Wellsee 400w



Nota: adaptado de (Wellsee)

Los otros aerogeneradores nombrados generan una potencia menor en comparación al Wellsee 400w, sin embargo en cuanto a potencia entregada superan a la que se alcanza con el prototipo realizado durante este trabajo. El GudCraft 10W y el ALEKO WGV45W también se pueden comprar por internet y sus precios están entre 170-270 USD más los gastos de envío.

La principal ventaja del sistema propuesto en este trabajo, es que al ser un aerogenerador de eje vertical, es apto para emplazar incluso a nivel del suelo, y por lo tanto trabajar a bajas velocidades, sin depender de la dirección del viento.

En cuanto a las desventajas actuales del prototipo propuesto, por el mismo hecho de ser de eje vertical, y considerado como tipo Savonius, es altamente ineficiente (C_p

teórico de 0.02), además este tipo de aerogeneradores son difíciles de proteger de altas velocidades de corriente (tormentas), es decir, alta velocidad de rotación que puede inducir vibración, pérdida de potencia e incluso destrucción total del sistema.

El costo de construcción es una alta desventaja, alrededor de 800 USD, esto es alto pero depende de los materiales que se usen para el proceso. Sin embargo esta última característica podría disminuirse si se logra bajar costos de construcción mediante la utilización de materia prima nacional (tela y fibra de vidrio), volviendo el costo una ventaja de este prototipo en cuanto a otros equipos existentes. Otro factor importante es el dinamo, puesto que al ser importado, su costo es alto (alrededor de 600 USD), para esto se podrían buscar equipos (dinamos) más económicos dentro del país.

En Colombia existen algunas empresas que distribuyen aerogeneradores importados, a bajos precios, como es el caso de la empresa Energías alternas Ltda. Es una empresa dedicada al diseño y venta de equipos de energía solar y eólica, establecida en Cartagena desde el año 1984. Allí se pueden comprar aerogeneradores de eje horizontal de potencia desde 400 W hasta 900 W, los precios oscilan entre 600 y 2900 USD. Otras empresas ubicadas en Colombia son ALTA Ingeniería XXI, Idelect, Sunpower y Ecopower solutions, sin embargo, como la primera empresa mencionada, distribuyen aerogeneradores de eje horizontal de potencia mayor a 100W, por lo que no son competencia directa con el prototipo presentado.

Alrededor del mundo existen empresas dedicadas a la fabricación de aerogeneradores de baja potencia (menos de 1 kW), tanto de eje vertical como eje horizontal, encontrándose las más importantes en los países desarrolladores bandera de esta tecnología, como son Estados Unidos, China y Alemania. En Canadá se han vendido en los últimos años alrededor de 800 aerogeneradores de baja potencia al año, se ha visto un importante crecimiento en el mercado, especialmente en los aerogeneradores de 1 kW. Las aplicaciones con mayor futuro son carga de baterías en viviendas, granjas, lugares comerciales y comunidades aisladas en el norte del país. (Cuesta Santianes, Pérez Martínez, & Juan Antonio, 2008)

CONCLUSIONES

- Teniendo en cuenta los requerimientos de diseño y los materiales presentes en la industria de cometas y parapentes, así como el concepto de tenseguridad y facilidad de armado, se realizó la búsqueda de materiales que se adaptaran, determinando que el material óptimo para la construcción del aerogenerador portátil es la tela (en este caso la tipo Rip-stop), caracterizada por su alta resistencia, baja porosidad y bajo peso. Adicionalmente, la rigidez de la estructura se logra por medio de varillas de fibra de vidrio, cuyas características las hacen ideales para soportar las cargas que soporta el aerogenerador al girar a velocidades de viento entre ligero y fresco.
- Otro de los elementos fundamentales para el aerogenerador es el generador eléctrico, que para este caso se seleccionó el dinamo Schmidt Son Delux como generador principal del sistema, debido a características como su bajo peso, alta eficiencia (según estudios realizados en bicicletas) y la garantía que representa esta marca en el mercado internacional en comparación con otras marcas de dinamos y tipos de generadores, aunque su costo de adquisición es elevado por ser un elemento importado. Otra desventaja del dinamo es su alto torque de arranque, lo que obliga al sistema a operar a velocidades de viento más altas de las esperadas, y aún se necesita un sistema de transmisión que mejore la eficiencia de la generación. En el futuro, para lograr disminuir costos, podría ser influyente la selección de un motor, generador o dinamo de fácil adquisición en el mercado nacional y que presente características similares a las que tiene el Son Delux, o se podría pensar en la construcción de un dinamo que presente menor torque de arranque y el sistema logre una eficiencia cercana a la deseada.
- Teniendo en cuenta los requisitos de facilidad de transporte y ensamble, se diseñó una estructura colapsable con el concepto de tornillo de Arquímedes. El diseño propuesto es un aerogenerador de eje vertical que podría considerarse tipo Savonius no convencional (por lo que los valores de TSR teóricos no le aplican en un 100%). El tipo Savonius-Darrieus muestra posibles mejores prestaciones, sin embargo, cuando se realizaron pruebas de validación el

diseño, se detectaron serios problemas estructurales que impidieron el correcto funcionamiento de este sistema, por este motivo se descartó la estructura tipo Savonius-Darrieus temporalmente, mientras se busca una solución final a estos problemas.

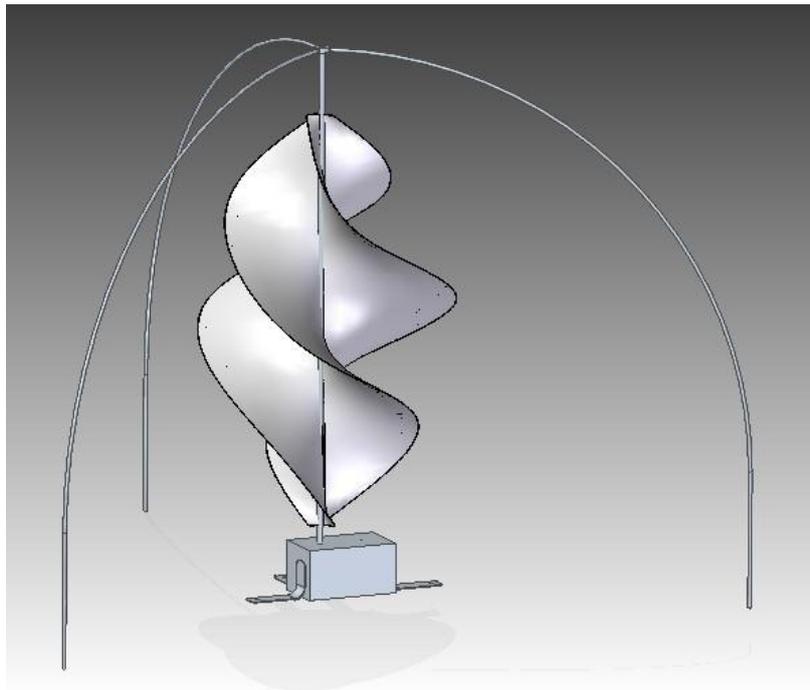
- El prototipo Savonius genera energía eléctrica suficiente para cargar la batería de un teléfono celular, aunque necesita de un tiempo prolongado para lograrlo (más de 10 horas), lo que lo hace poco útil en la vida real, aunque para un campamento de emergencia podría ser la única solución para la generación de energía eléctrica. Su eficiencia (C_p) no logra los valores teóricos en aproximadamente un 27% de error, siendo un resultado no válido para la investigación y se debe buscar solución a los problemas para que el modelo funcione adecuadamente. Este valor del error puede ser causado por situaciones como la vibración (debida a que el eje se encuentra empotrado en un extremo), que genera altas pérdidas en el sistema, o también el sistema de transmisión entre el aerogenerador y el dinamo, puesto que si la relación de transmisión aumenta, es probable que el torque en el dinamo disminuya y gire a mayor velocidad, generando mayor cantidad de energía eléctrica.
- En el mercado actual, el sistema propuesto presenta la ventaja de ser un aerogenerador de eje vertical, por lo tanto es apto para emplazar incluso a nivel del suelo, y trabajar a bajas velocidades, sin depender de la dirección del viento. Sin embargo el prototipo presenta errores mayores al 20%, siendo poco útil actualmente, por lo que es necesario realizar mejoras estructurales, con el fin de alcanzar mayor eficiencia del sistema (más generación de energía), además de buscar la reducción de costos de producción, de modo que el producto final sea realmente asequible a las personas del común.

RECOMENDACIONES

Después de haber realizado simulaciones a ambos prototipos y su respectiva comparación, se puede asegurar que uno de los principales problemas de ambos es la vibración. Esto se debe principalmente a que el eje está empotrado en un extremo, por lo que la fuerza que genera el viento sobre las palas del aerogenerador es suficiente para generar una torsión y oscilación, y conseguir altas pérdidas de potencia, e incluso, con el tiempo, que el sistema colapse.

La recomendación consecuente es diseñar una estructura externa en la que se pueda empotrar el eje en el extremo superior (ver Figura 50), disminuyendo las vibraciones, y por consiguiente aumentar la eficiencia del aerogenerador.

Figura 50. Propuesta para nueva estructura



Como se mencionó en el numeral 8.2 del presente documento, para el rotor Savonius-Darrieus se necesitan hacer modificaciones estructurales, con el fin de conseguir rigidez en las alas inflables y por lo tanto lograr una estabilidad en el sistema (que no se colapse). La solución podría encontrarse en dos posibilidades, que son:

- Estructura rígida.
- Alas inflables usando concepto de tensegridad (no parapente).

La primera opción podría hacer que el sistema dejara de ser fácilmente portable, aumentando el peso considerablemente, sin embargo se pueden buscar alternativas de materiales de bajo peso con el que se puedan construir perfiles internos, siguiendo el mismo concepto de ala inflable tipo parapente.

La segunda opción es la más viable respecto al diseño planteado inicialmente, e incluso el diseño original no cambiaría, pues consiste en crear alas de perfil completamente cerrado con una válvula para inflado manual, siendo rígidas desde que se procede al armado de la estructura y de este modo no colapsarían fácilmente.

Otra recomendación a tener en cuenta, es realizar nuevamente los cálculos para definir la transmisión de potencia entre el aerogenerador y el dinamo, esta relación podría ser de al menos 1:5, con el fin de disminuir el torque presente en el dinamo y aumentar su velocidad, para lo cual podría ser necesario un cambio de dimensiones en la caja contenedora y aumentaría el peso (no en gran medida), de modo que el arrastre generado no sea significativamente alto.

BIBLIOGRAFÍA

- Danish Wind Industry Association*. (1997). Recuperado el 27 de noviembre de 2012, de http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wres/index.htm
- Tipos de energía*. (febrero de 2006). Recuperado el 18 de septiembre de 2011, de <http://tipos-de-energia.blogspot.com/2006/02/energa-elica-tipos-de-generadores.html>
- Hymini*. (18 de octubre de 2007). Recuperado el 18 de septiembre de 2011, de <http://es.engadget.com/2007/10/18/hymini-carga-lo-que-quieras-con-energia-solar-eolica-cables-us/>
- Solar stik breeze*. (septiembre de 2008). Recuperado el 18 de septiembre de 2011, de <http://www.fayerwayer.com/2008/09/solar-stik-breeze-energia-solar-y-eolica-transportable/>
- Word Press*. (10 de octubre de 2008). Recuperado el 24 de abril de 2012, de <http://urjart.wordpress.com/2008/10/10/types-of-wind-energy-converters/>
- Eolic*. (07 de febrero de 2010). Recuperado el 18 de septiembre de 2011, de <http://blog.is-arquitectura.es/2010/02/07/eolic-aerogenerador-domestico-plegable-y-telescopico/>
- Aero E*. (04 de marzo de 2011). Recuperado el 18 de septiembre de 2011, de <http://roundedoff.com/2011/03/04/aero-e-helps-charge-your-phone-through-wind-energy/>
- Greenerator*. (06 de julio de 2011). Recuperado el 18 de septiembre de 2011, de <http://generatuenergia.com/2011/07/06/greenerator-genera-tu-energia-desde-tu-mismo-balcon-eolica-y-fotovoltaica/>
- Alean Vanegas, D. J., & Herrón Gómez, D. (2007). Análisis de variables que intervienen en la generación de energía eólica a velocidades medias y bajas en Colombia. Medellín, Antioquia, Colombia.

- Alibaba.* (s.f.). Recuperado el 17 de Febrero de 2013, de <http://spanish.alibaba.com/product-gs/400w-wellsee-portable-wind-turbine-ws-wt400-564811772.html>
- Allen, L., & Creech, M. (17 de Agosto de 2011). *Patente nº EP1817450 B1.*
- Amazon.* (s.f.). Recuperado el 17 de Febrero de 2013, de http://www.amazon.com/GudCraft-Vertical-Wind-Turbine-Generator/dp/B005M1LQCI/ref=sr_1_3?ie=UTF8&qid=1361152983&sr=8-3&keywords=wind+generator
- Amazon.* (s.f.). Recuperado el 17 de febrero de 2013, de http://www.amazon.com/ALEKO-WGV45W-Residential-Vertical-Generator/dp/B008CV6UF8/ref=sr_1_3?ie=UTF8&qid=1361153169&sr=8-3&keywords=wind+generator+turbine+vertical+axis
- Askeland, D. R. (s.f.). *Ciencia e ingeniería de los materiales.* International Thomson Editores.
- Barbato, K., Fredette, B., Kamon, K., & White, L. (16 de abril de 2004). Ribbon Propeller Drive. *Desing Proposal.*
- Breuer, J., Ockels, W., & Luchsinger, R. H. (s.f.). An inflatable wing using the principle of Tensairity. Delf, Holanda: AIAA.
- Brown, G., Haggard, R., & Norton, B. (2001). Inflatable Structures for Deployable Wings. *American Institute of Aeronautics and Astronautics.*
- Cadogan, D., & Scarborough, S. (2001). Rigidizable Materials for use in Gossamer Space Inflatable Structures. *42nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference & Exhibit.* Seattle: AIAA.
- (2007). The early development of the screw propeller. En J. Carlton, *Marine propellers and propulsion* (2 ed.). Gran Bretaña: MPG Books Ltd.
- China suppliers.* (s.f.). Recuperado el 21 de noviembre de 2012, de <http://climb0917.en.made-in-china.com/productimage/zqmEPYUMHwVy-2f0j00sSZtFjdRwTkO/China-Flexible-High-Strength-Fiberglass-Banners-Pole-CLIM-P-.html>

- Cuesta Santianes, M. J., Pérez Martínez, M., & Juan Antonio, C. J. (2008). *AEROGENERADORES DE POTENCIA INFERIOR A 100KW*. Obtenido de http://www.ciemat.es/CIEMATportal/recursos/doc/Areas_Actividad/Prospectiva_Tecnologica/34301686_211200911951.pdf
- De Gaspari, A., & Ricci, S. (2010). Combining Shape and Structural Optimization for the Design of Morphing Airfoils. *2nd International Conference on Engineering Optimization*. Lisboa.
- DOVER, I. (s.f.). *ILC DOVER creating what's next*. Recuperado el 09 de 05 de 2013, de <http://www.ilcdover.com/UAV-Wings/>
- Empresa Fulltex*. (s.f.). Recuperado el 20 de noviembre de 2012, de <http://www.empresafulltex.cl/newfulltexsitio/etecnica.php>
- Fabricato. (s.f.). *Fabricato*. Recuperado el 2013, de <http://www.fabricato.com/site/Productos/Licitaciones/tabid/106/Default.aspx>
- Fu, P., & Farzaneh, M. (2010). A CFD approach for modeling the rime-ice accretion process on a horizontal-axis wind turbine. *Elsevier*.
- IDEAM, & UPME. (2006). *Atlas de radiación solar de Colombia*. Bogotá: Imprenta nacional de Colombia.
- IDEAM, & UPME. (2006). *Atlas de viento y energía eólica de Colombia*. Bogotá: Imprenta nacional de Colombia.
- Ifju, P., Lee, K.-H., Albertani, R., Mitryk, S., Boria, F., & Abdulrahim, M. (19 de Febrero de 2008). *Patente nº US 7.331.546 B2*. Estados Unidos.
- Into the wind*. (s.f.). Recuperado el 2013, de http://www.intothewind.com/shop/Repair_and_Kitemaking/Fabric_for_kitemaking_or_kite_repair/3-4-oz._Nylon
- JanClaes*. (s.f.). Obtenido de <https://plus.google.com/113613585650434126323/posts?banner=pwa>
- Lafgo*. (s.f.). Obtenido de <http://www.lafgo.com.co/nuestras-telas-es/>
- Ledo, L., Kosasih, P., & Cooper, P. (2011). Roof mounting site analysis for micro-wind turbines. *Elsevier*.

- Lingard, J. (1995). Ram-air parachute design. *13th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference*. Clearwater Beach: AIAA.
- Martínez Carballido, P. (2011). *Diseño, simulación y construcción del prototipo del rotor de un aerogenerador para la implementación de un sistema de control*. Santo Domingo Tehuantepec Oaxaca.
- Martínez Molina, C. H., & Bohórquez Quiroz, J. M. (2009). Generación eólica: conceptos básicos, situación actual y futura en Colombia y el mundo. Medellín.
- MATBASE. (s.f.). Recuperado el 21 de noviembre de 2012, de <http://www.matbase.com/material/fibres/glass/e-glass-fiber/properties>
- Orange wind generator. (s.f.). Recuperado el 18 de septiembre de 2011, de http://www.gotwind.org/diy/Orange_Wind_Generator.htm
- Other Power. (s.f.). Recuperado el 14 de Noviembre de 2011, de <http://www.otherpower.com/winbasics2.html>
- Peter White Cycles. (s.f.). Obtenido de <http://www.peterwhitecycles.com/schmidt.asp>
- Peterson, C., Strickland, J., & Higuchi, H. (1996). The fluid dynamics of Parachute inflation. *Annual Reviews*.
- Ripstop. (s.f.). Recuperado el 20 de noviembre de 2010, de <http://es.wikipedia.org/wiki/Ripstop>
- SCHMIDT. (s.f.). Obtenido de <http://www.nabendynamo.de/produkte/dynamos.html>
- Simpson, A., Jacob, J., & Smith, S. (26 de septiembre de 2005). Inflatable and warpable wings for meso-scale UAV's. *AIAA Infotech @Aerospace*. Lexington.
- Stein, K., Benney, R., Tezduyar, T., Leonard, J., & Accorsi, M. (2001). Fluid-Structure Interactions of a Round Parachute: Modeling and Simulation Techniques. *Journal of aircraft*.
- Victoria Outdoor Gear. (s.f.). Recuperado el 20 de noviembre de 2012, de http://www.misaplicaciones.com/1/bnotas.php?tipo=ver&id_nota=8528&id_empresa=84&leng=

Wellsee. (s.f.). Recuperado el 17 de Febrero de 2013, de https://www.google.com.co/search?q=Wellsee+400w&hl=es&tbo=d&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ei=D44hUd-CGILs9ATVjoGYCg&ved=0CAcQ_AUoAQ&biw=1422&bih=776#imgrc=zTQEupAYDFxUyM%3A%3BwL9VAHeU3Ms_4M%3Bhttp%253A%252F%252Fimg.alibaba.com%252Fphoto%252F523227838%252FWELL

ANEXOS

ANEXO A

DISEÑO DE UN AEROGENERADOR PORTÁTIL DE EJE VERTICAL (PORTABLE VAWT DESIGN)

Sara Echeverry Jaramillo¹, Marcela Molina Cerezo²

*Facultad de Ingeniería Aeronáutica
Universidad Pontificia Bolivariana, Cq. 1 #70-01, Medellín, Colombia,*

Resumen: los desastres naturales o accidentes de gran tamaño provocados por la humanidad vienen acompañados por una precariedad o falta total de suministro de electricidad, entre otros servicios básicos. Esto tiene varios efectos sobre las personas afectadas por este tipo de eventos y el personal de rescate que llega a estos lugares a prestar sus servicios. El tener acceso a sistemas de información básicos, mediante la conexión de radios de banda corta, permiten prevenir fatalidades adicionales asociadas a replicas de los factores que pudieron dar lugar al desastre. Este artículo tiene como propósito mostrar el proceso de diseño de un aerogenerador de eje vertical, portátil y de baja potencia, teniendo presentes criterios de portabilidad, facilidad de ensamble y transporte, brindando la posibilidad de suministro eléctrico para equipos básicos de comunicación e iluminación en campamentos transitorios o actividades recreativas (camping). Se indican las características y generalidades del viento. Se realiza un estudio a los diferentes tipos de aerogeneradores, con el fin de escoger la configuración adecuada para el proyecto. Finalmente se efectúan análisis computacionales de diferentes diseños y se evalúan sus ventajas y desventajas frente a diseños existentes en el mercado.

Palabras clave: aerogenerador de eje vertical (Savonius y Darrieus), ala inflable, tornillo de Arquímedes.

Abstract: natural disasters or accidents caused by humans are accompanied by a precarious or total lack of electricity, among other basic services. This has several effects on the people affected by these events and rescue personnel coming into these places to serve. Having access to basic information systems, by connecting narrowband radios allow further prevention of fatalities associated with replicas of the factors that could lead to disaster. The purpose of this paper is to show the design process of a wind turbine, which is vertical axis, portable and low-speed and low power, taking into account criteria of portability, ease of assembly and transport, offering the possibility of electric power for basic communication equipment, lighting in temporary camps or camping. The general characteristics of wind and wind resource in Colombia are shown. A study of the different types of wind turbines is made in order to choose the appropriate settings for this project. Finally, computational analyzes are performed in different designs and evaluation of its advantages and disadvantages compared to existing designs in market.

Keywords: vertical wind turbine (Savonius & Darrieus), inflatable wing, Archimedes screw

¹ Correo: sara.echeverry@alfa.upb.edu.co

² Correo: marcela.molina@alfa.upb.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el país vive situaciones ambientales que afectan drásticamente las condiciones de vida de las personas. Cuando ocurre una temporada invernal y hay familias que necesitan ser trasladadas a campamentos transitorios, se debe tener una manera de suplir las condiciones básicas para que ellos puedan pasar por lo menos una noche en estos lugares.

Entre otras, se necesitan soluciones portátiles para el suministro de energía, que les permita asegurar el abastecimiento de electricidad para luminarias en la noche o cargar instrumentos de comunicación básica, tanto a las familias afectadas, como al personal que presta los servicios de rescate.

Estas soluciones deben procurar el uso de fuentes alternativas de energía, con el fin de no verse afectadas para su operación, debido a la catástrofe natural, accidente o desastre que esté tratándose de resolver, puesto que es muy probable las fuentes convencionales no estarán disponibles de forma inmediata.

Además, como podría ser una solución a emplearse por los rescatistas que acudan a estos sitios, debe ser de bajo peso, fácil transporte e instalación, que no entorpezca su desplazamiento y las operaciones de rescate.

En este proyecto se pretende realizar el diseño de un aerogenerador de baja velocidad (vientos entre ligero y fresco), de eje vertical y de uso portátil, que se desarrollará tomando como base estructuras aerodinámicas y procesos de manufactura usuales en el diseño y concepto de ala inflable; utilizando materiales como tela y fibras, con el fin de reducir peso y aumentar la eficiencia del aerogenerador mediante la combinación de fuerzas de arrastre y sustentación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. La energía del viento

Un aerogenerador obtiene su potencia de entrada convirtiendo la fuerza del viento en un par, actuando sobre las palas del rotor. La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, del área de barrido del rotor y de la velocidad del viento. (Danish Wind Industry Association, 1997)

Se sabe que la energía cinética de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa. De este modo, la energía cinética del viento depende de su densidad. A condiciones estandar el aire tiene una densidad de $1,225 \text{ kg/m}^3$. La densidad disminuye ligeramente con el aumento de la humedad y aumenta cuando la temperatura baja. A grandes altitudes (en las montañas) la presión del aire es más baja y el aire es menos denso. (Danish Wind Industry Association, 1997).

2.2. Potencia del viento

La velocidad del viento es muy importante para la cantidad de energía que un aerogenerador puede transformar en electricidad. La cantidad de energía que posee el viento varía con el cubo de la velocidad, es decir, si la velocidad del viento se duplica la cantidad de energía será ocho veces mayor.

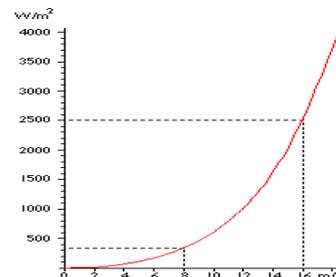


Fig. 1. Potencial eólico respecto a la velocidad del viento. Tomada de (Danish Wind Industry Association, 1997)

La ecuación que define la potencia de viento disponible (P_d) para un aerogenerador es:

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

Donde:

ρ : densidad del aire (Kg/m^3)

A: área transversal del aerogenerador (m^2)

v: velocidad del viento (m/s)

La densidad de potencia depende de la densidad del aire linealmente, es decir, si el aire es frío, presenta una densidad de potencia superior, al igual que un lugar situado a nivel del mar presenta mayor temperatura y densidad superior que lugares más altos.

2.3. Ley de Betz

En los aerogeneradores la potencia aprovechada es limitada según la ley de Betz, mientras mayor sea la energía cinética que un aerogenerador extraiga del viento, mayor será la disminución de la velocidad que sufrirá el viento a la salida. Ningún generador puede extraer del viento una potencia superior a la establecida por esta ley. (Martínez Molina & Bohórquez Quiroz, 2009)

La ley de Betz dice que sólo puede convertirse menos de $16/27$ (el 59 %) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador. (Martínez Molina & Bohórquez Quiroz, 2009)

2.4. Densidad de potencia

Normalmente, los aerogeneradores comunes están diseñados para empezar a girar a velocidades alrededor de 3-5 m/s (velocidad de conexión). El área azul de la izquierda (ver Fig. 2) muestra la pequeña cantidad de potencia perdida debido al hecho de que la turbina sólo empieza a funcionar a partir de, alrededor de 5 m/s.

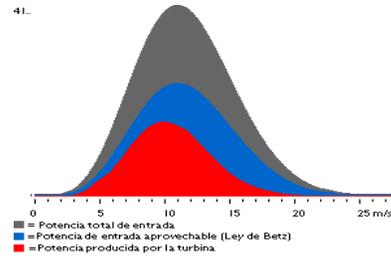


Fig. 2. Densidad de potencia. Tomada de (Danish Wind Industry Association, 1997)

Un aerogenerador se programa normalmente para pararse a altas velocidades del viento, de alrededor de 25 m/s, para evitar posibles daños en la turbina o sus alrededores. La velocidad del viento de parada se denomina velocidad de corte. El área azul de la derecha representa la pérdida de potencia. (Danish Wind Industry Association, 1997)

2.5. Curva de potencia

La curva de potencia de un aerogenerador es un gráfico que indica cuál será la potencia eléctrica disponible en el aerogenerador a diferentes velocidades del viento. La curva típica de potencia se construye por medidas directas de la potencia eléctrica y la velocidad medida a la altura del centro del rotor y depende de cada aerogenerador. Luego se lee la potencia eléctrica disponible directamente del generador.

2.6. Coeficiente de potencia

El coeficiente de potencia indica con qué eficiencia el aerogenerador convierte la energía del viento en electricidad. Se obtiene dividiendo la potencia eléctrica disponible por la potencia eólica de entrada, para medir qué tan eficiente (técnicamente) es un aerogenerador.

2.7. Análisis estructural

Los aerogeneradores están sujetos a vientos fluctuantes y, por tanto, a fuerzas cambiantes. Esto se da particularmente en el caso de estar emplazados en un clima eólico muy turbulento.

Los componentes sujetos a una flexión repetida pueden desarrollar grietas, que pueden provocar la rotura del componente. Para realizar un análisis estructural es importante tener en cuenta la fuerza del viento en el rotor y la velocidad específica óptima de diseño.

2.8. Clasificación de aerogeneradores

Los aerogeneradores se pueden clasificar básicamente en dos:

- Los HAWT (Horizontal Wind Turbine) son los más utilizados y de mayor potencia.
- Los VAWT (Vertical Wind Turbine) no son tan usados como los HAWT pues se han realizado numerosos prototipos, pero por razones técnicas y económicas su implantación en la práctica es muy limitada. Se caracterizan por que el viento los roza perpendicular a la dirección de su eje, garantizando en todo momento que giren respecto a la velocidad del aire circundante, por lo tanto estos aerogeneradores no dependen de una orientación alguna para producir electricidad siempre y cuando exista viento. Los hay de tipo Darrieus y Savonius.

3. SELECCIÓN DE MATERIALES

3.1. Material principal

Teniendo en cuenta los requerimientos de diseño (bajo peso, flexibilidad, portabilidad y estructura deformable), la tela es la materia prima adecuada para la construcción de las aspas. La tela escogida es la de tipo Rip-stop, debido a las condiciones que presenta como el bajo peso, baja porosidad y resistencia al desgarre.

3.2. Material estructural

Para darle forma a la estructura las varillas de fibra de vidrio o carbono son el mejor material, debido a su gran resistencia y ligereza. Estas varillas están fabricadas con

materiales sintéticos y se consiguen en el mercado en dos presentaciones básicas, las huecas o tubos que son más ligeras y las macizas que son más fáciles de producir.

La fibra de vidrio con relación al carbono, es más pesada, aunque es más resistente a impactos, flexible, y de menor costo, estas características dependen del tipo de vidrio del cual esté hecho. Las propiedades de la fibra de vidrio pueden variar según el método de fabricación y materiales usados.

4. SELECCIÓN DEL GENERADOR ELÉCTRICO

Para la selección del generador eléctrico se realiza una búsqueda de las marcas de dinamos de bicicletas y motores de aeromodelismo más usados, teniendo en cuenta el bajo peso, la potencia, las revoluciones por voltio (denominado kv), la eficiencia y el precio en el mercado.

A pesar que los motores de aeromodelismo (marca Hacker) analizados tienen alta ventaja en cuanto a su peso y precio, fueron descartados puesto que se necesitan altas revoluciones para lograr el voltaje necesario para cargar cualquier sistema de comunicación básico, esto es más de 1000 rpm para lograr generar 3 V.

Se selecciona el dinamo Schmidt Son Delux por su bajo peso, aunque su costo es mayor que otros, pero es de alta eficiencia, además se tuvo en cuenta la reputación de la marca y las características generales de el dinamo.

La desventaja más alta que presenta el dinamo SON Delux es que, a pesar de que no genera mucha resistencia cuando se pedalea con luces apagadas (sin carga), el torque necesario para moverlo (torque inicial) es alto (0.1 N.m) para ser superado por el sistema diseñado, esto podría traer problemas a la hora de iniciar la generación de energía a partir de velocidades de viento bajas.

Para solucionar este problema, se debe diseñar un sistema de transmisión que permita la reducción de torque en el dinamo, de modo que el movimiento del sistema

tenga la suficiente fuerza para superar el torque inicial.

Adicionalmente, con el fin de que el pueda mantener una constante generación de energía, es importante adicionar al sistema un rectificador y regulador. Para esto se incorporará el sistema de carga y la batería E-Werk de la marca Busch & Müller, que controla voltajes entre 2.8 a 13.3 V y corriente de 0.1 a 1.5 A y provee potencia de hasta 16 W.

5. DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

Para comenzar el proceso de diseño, se realizaron estudios relacionados con el perfil aerodinámico a usar en las palas del aerogenerador (inicialmente tipo Darrieus), con el fin de analizar el proceso de llenado de la estructura (ala inflable) y su comportamiento al estar en movimiento. Posteriormente se llegó a la conclusión de que el aerogenerador tipo Darrieus no es viable sin la ayuda de un motor de arranque.

Se realizó el análisis mediante CFD del perfil enfrentado al viento a 3 ángulos de ataque (0, 5 y 10°) y a baja velocidad (3 m/s). Se observó el proceso de llenado de aire para verificar el arrastre generado durante este momento de modo que este valor no superara la fuerza del aspa y ésta lograra avanzar en la dirección adecuada.

Se observó que el perfil genera sustentación, lo cual lo hace óptimo para ser utilizado en las aspas de un VAWT. Durante el llenado del perfil se evidenció también que inicialmente el arrastre crece rápidamente, para luego disminuir gradualmente hasta alcanzar el arrastre de un perfil cerrado. Sin embargo, este arrastre inicial puede afectar el sentido de rotación del aerogenerador si la fuerza de sustentación no es suficiente para romper la inercia que lo mantiene estático.

A partir de lo anterior se concluyó que es fundamental asegurarse de que las aspas del aerogenerador enfrenten al viento con un ángulo de ataque mayor a 0°, puesto que a este ángulo no se genera sustentación, por ser un perfil simétrico, por lo tanto la rotación

se iniciaría en sentido opuesto y las aspas no se llenarían, al no enfrentar directamente el viento.

Teniendo en cuenta que el material principal de fabricación del aerogenerador es tela, resulta complejo controlar el ángulo de ataque de las palas. Partiendo de esto, se empezó a considerar la posibilidad de realizar un cambio estructural que permitiera mejorar las condiciones de operación. Para esto se analizaron dos posibles diseños:

- Usar un rotor Savonius como motor inicial para el aerogenerador Darrieus diseñado inicialmente, permitiendo la eliminación del torque negativo que éste genera al inicio del movimiento (ver Fig. 3)

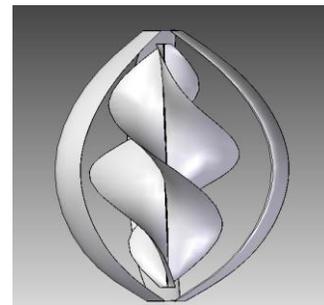


Fig. 3. Aerogenerador Savonius-Darrieus

- Rotor Savonius que sea la estructura principal del aerogenerador (ver Fig. 4)

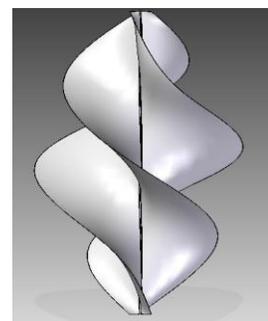


Fig. 4. Aerogenerador tipo Savonius

Con el fin de seleccionar la estructura adecuada para el aerogenerador, se realizaron estudios computacionales de ambas opciones (Savonius y rotor Savonius-Darrieus), comparando el torque generado a diferentes velocidades. Posteriormente se realizaron pruebas de campo de ambos modelos, con el fin de seleccionar el más

adecuado para la aplicación en campamentos transitorios.

6. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Para el análisis estructural se realizó una idealización de la estructura (con sólo dos aspas) con el fin de calcular la fuerza del viento a una velocidad a la que se considera que el aerogenerador sufrirá deformaciones y por lo tanto disminuirá su capacidad de generación (15 m/s), esto para verificar la deformación máxima que tendrá el eje y evitar posibles daños estructurales a grandes velocidades del viento. La estructura del aerogenerador idealizada (vista desde arriba) se observa en la Fig. 5.

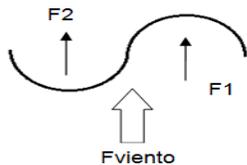


Fig. 5. Estructura idealizada y diagrama de fuerzas

Para calcular la fuerza ejercida sobre la geometría, se realizaron los cálculos:

$$F_{viento} = F1 + F2$$

$$\lambda = 0,8 = \frac{\Omega * 0,3}{15}$$

$$\Omega = 40 \text{ rad/s}$$

Para calcular la fuerza ejercida sobre cada cara, se tiene en cuenta el valor del coeficiente de arrastre específico (Cd) para media circunferencia cóncava o convexa, que son valores teóricos, teniendo:

$$Cd_1=2.3 \quad \text{y} \quad Cd_2=1.2$$

Se solucionó la ecuación para despejar la fuerza del viento (en función de la velocidad V) ejercida sobre el aerogenerador, así:

$$F_{viento} = \frac{1}{2} \rho A [Cd_1 * (V + \Omega * R)^2 + Cd_2 * (V - \Omega * R)^2] \cong 292.24 \text{ N}$$

Seguidamente se hizo un análisis estructural del eje empotrado en un extremo, con una fuerza aplicada transversalmente (Fviento), lo que genera un pandeo. Se busca identificar la deformación máxima (Ymax) del eje de fibra de vidrio (con módulo de elasticidad E=73 GPa).

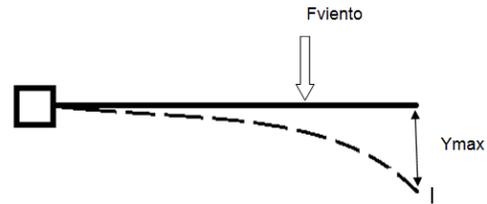


Fig. 6. Diagrama de fuerza sobre el eje

Para conocer el valor de la deformación máxima que tendrá el eje se utiliza la ecuación:

$$Y_{max} = \frac{5 * F * L^3}{48 * E * I} \cong 10 \text{ cm}$$

Para un eje hueco se considera la siguiente ecuación:

$$I = \frac{\pi}{4} * (r_2^4 - r_1^4) = 5x10^{-9} m^4$$

Donde:

I: momento de inercia (m⁴)

r2: radio exterior = 0.01 m

r1: radio interior = 0.007 m

Se puede concluir que a velocidades de viento altas, la deformación del eje sería grande, y como el sistema tiende a vibrar, esta deformación podría causar fatiga al material y posteriormente su falla. Por lo tanto, se recomienda emplazar el aerogenerador en lugares donde la velocidad del viento no supere los 7.5 m/s, con el fin de prevenir problemas estructurales por vibración y fatiga.

También es importante definir la transmisión de potencia entre el eje del aerogenerador y el dinamo, para lo cual se definió una configuración de poleas unidas por una correa. Para encontrar una transmisión eficiente entre las poleas, se analizó el ángulo de contacto, para esto se utilizó la siguiente ecuación:

$$\theta d = \pi - 2 \sin^{-1} \frac{D - d}{2c} = 180^\circ$$

Donde:

- θd : ángulo de contacto ($^\circ$)
- D: diámetro mayor (40 mm)
- d: diámetro menor (40 mm)
- c: distancia ente los centros (75 mm)

Teniendo en cuenta el anterior resultado se asegura una relación 1:1 entre poleas y que las tensiones en el sistema sean iguales.

Debido al alto torque que es necesario vencer para dar movimiento a el dinamo, fue necesario mejorar la ventaja mecánica, aumentando el diámetro de la polea acoplada a la manzana de el dinamo a 83 mm, logrando así, vencer el torque que se genera justo antes de que se inicie el movimiento de rotación. Así mismo, se realiza una reducción en el diámetro del eje motriz acoplado al aerogenerador a 30mm (asegurando una relación 1:3), para que al igual que en los sistemas de bicicletas se reduzca el trabajo realizado por el aerogenerador, que finalmente va a mover el sistema, consiguiendo disminuir el número de revoluciones por minuto de el dinamo.

7. ANÁLISIS DE DISEÑO

7.1. Rotor Savonius

Para el rotor Savonius el diseño se basó en el concepto de “tornillo de Arquímedes”, conocido también como “tornillo sinfín”.

La geometría del rotor Savonius se analizó computacionalmente mediante CFD (Ansys Fluent). Las simulaciones realizadas corresponden al comportamiento del rotor a diferentes velocidades, buscando la estabilidad del sistema y comparando el torque generado con el torque inicial de el dinamo, con el fin de encontrar la velocidad mínima de operación.

Se analizó inicialmente a una velocidad del viento de 3 m/s, con el fin de verificar su estabilidad y torque generado (positivo), y después de lograr la estabilidad del sistema (0.5 segundos), el rotor alcanza a generar energía con un coeficiente de potencia (Cp)

de 0.025 (valor máximo), es decir, que convierte el 2.5% de la energía disponible del viento en potencia.

La energía disponible se calculó usando la ecuación 1, y se obtuvo $P_d=9.9225$ W, a una velocidad de viento de 3 m/s y tomando el área transversal del rotor como rectangular (0.6 m²), entonces teóricamente se deberían generar 0.248 W de potencia.

7.2. Rotor Savonius-Darrieus

Seguidamente se realizaron simulaciones y estudios sobre la geometría del rotor Savonius-Darrieus, con el fin de verificar la operación del aerogenerador Savonius con la influencia del aerogenerador Darrieus.

También se analizó inicialmente a una velocidad del viento de 3 m/s, y después de lograr la estabilidad del sistema (0,5 segundos), el rotor alcanza a generar energía con un coeficiente de potencia (Cp) de 0.02 (valor máximo), es decir, que convierte el 2% de la energía disponible del viento en potencia. Sin embargo, en el análisis posterior a la simulación, se observa que el torque generado es negativo, es decir, posiblemente este diseño tiende a girar en la dirección contraria a la de diseño, y por tal motivo se aprovecha menos la energía.

Con los datos obtenidos en el post de Ansys Fluent, se observó un torque de 0.1432 N.m (negativo), que para la velocidad de operación (6 rad/s) corresponde a una potencia de 0,859 W, es decir, con respecto a la potencia disponible de 15.876 W (velocidad 3 m/s y área 0.96 m²), el Cp es de 0.054 lo que indica que el rotor Savonius-Darrieus aprovecha el 5.4% de la energía disponible, generando 0.859 W de potencia, mayor a la generada por el rotor Savonius.

Si se mantienen las mismas dimensiones que para el rotor Savonius (1 m de altura y 0.3 m de radio), el aprovechamiento de la energía del rotor Savonius-Darrieus es comparablemente mayor, puesto que para una potencia disponible de 9.9225 W, se obtiene un Cp de 0.115. Es decir, el rotor Savonius-Darrieus aprovecharía el 11.5% de la energía de viento disponible.

Estos acercamientos nos llevan a pensar que si se mantienen las dimensiones, posiblemente el rotor Savonius-Darrieus tenga una eficiencia mayor al Savonius, sin embargo necesitaría de velocidades de viento mayores para su correcta operación. Si se aumenta el tamaño del rotor Savonius-Darrieus, se generaría mayor potencia a la misma velocidad del Savonius, aunque la eficiencia sea menor.

7.3. Comparación

Finalmente se realizaron simulaciones de ambas geometrías (del mismo tamaño: 1 m de alto y 0.3 m de radio) con el fin de comparar el torque generado, teniendo en cuenta una geometría ideal, es decir, que las palas del savonius logran una geometría cóncava y convexa, aprovechando más la energía del viento. Este torque es importante puesto que debe ser mayor al torque inicial de el dinamo (0.1 N.m) para lograr moverla y generar energía suficiente para cargar sistemas de comunicación básicos o luminarias tipo led.

Tabla 1. Comparación de Torque a diferentes velocidades

Velocidad (m/s)	Torque (N.m)	
	Savonius	Savonius-Darrieus
2	-	0,05213056
3	0,02951955	0,1160085
4	0,06791363	0,25460186
5	0,1112515	-
8	0,30834034	-

Como se observa en la Tabla 1, el rotor Savonius-Darrieus tiene la capacidad de mover el dinamo a velocidades más bajas que el rotor Savonius (3 m/s y 5 m/s respectivamente), siendo una alta ventaja comparativa a la hora del funcionamiento de ambos modelos.

Todos los análisis realizados anteriormente llevan a la selección del diseño de rotor tipo Savonius-Darrieus como la mejor opción para el aerogenerador, sin embargo, es importante hacer pruebas de campo (o de laboratorio) a ambos modelos con el fin de validar los datos y finalmente seleccionar el

que mejor se comporte frente a las condiciones de viento de diferentes lugares y los requerimientos de potencia.

Además, se debe tener en cuenta que los aerogeneradores tipo Savonius, por su diseño tienen una eficiencia muy baja, es decir C_p normalmente alrededor de 0.15, y al combinarlo con el tipo Darrieus se podrían generar problemas netamente estructurales, debido a la complejidad del Darrieus. La probabilidad de que el prototipo Savonius-Darrieus no funcione es alta, puesto que la construcción de un aerogenerador tipo Darrieus debe ser muy precisa para lograr su máxima capacidad de operación, es decir un C_p de alrededor de 0.4, y al combinarlo con el Savonius, la eficiencia se reduce a más de la mitad.

8. VALIDACIÓN DE DISEÑO

Se realizaron pruebas de laboratorio para lograr la caracterización de cada rotor, para esto se utilizó la salida del túnel de viento (con condición de viento no uniforme, sin embargo se toma el dato promedio de la velocidad del viento cerca al eje central del rotor) y equipos básicos de medición como tacómetro, voltímetro y anemómetro para tomar los datos necesarios y posteriormente realizar las gráficas correspondientes a velocidad del viento contra potencia entregada por el generador y velocidad de rotación.

8.1. Rotor Savonius

Al realizar la prueba del rotor se tuvo en cuenta el principio de funcionamiento del tornillo de Arquímedes (combinando fuerzas de sustentación y arrastre).

Además, como el prototipo no se construyó con concavidad en las palas, el aerogenerador podría girar en cualquier dirección, puesto que la fuerza que se genera entre una y otra es la misma en ambas direcciones de giro.



Fig. 7. Prototipo de aerogenerador tipo Savonius de radio 30 cm

En la Fig. 8 se observa que a medida que la velocidad del viento aumenta, de igual forma aumenta la velocidad de rotación del aerogenerador cuando no se aplica ninguna carga eléctrica alcanzando valores cercanos a 100 RPMs cuando la velocidad del viento es superior a 4 m/s, esto es porque el dinamo mantiene su torque constante.

Aunque el flujo no es uniforme en esta etapa del túnel, se utilizó un cono para direccionarlo, además se trabajó a varias velocidades de viento, cambiando la potencia del túnel con el fin de realizar las gráficas de caracterización del aerogenerador.

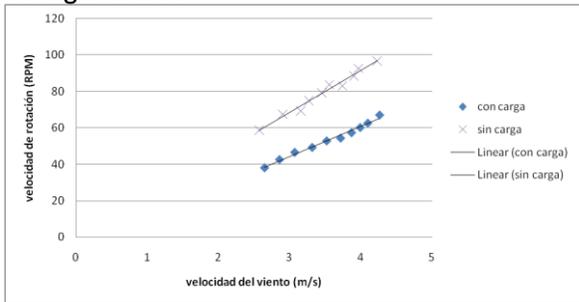


Fig. 8. Velocidad del viento vs Velocidad de rotación

Se observa también que sucede lo mismo incluso al aplicar una carga eléctrica al sistema, sin embargo, en esta prueba la velocidad de rotación máxima está limitada por el aumento de torque de el dinamo, llegando apenas a valores de rotación de 67 RPMs con velocidad del viento superior a 4 m/s, es decir una reducción de alrededor de 33%.

Se realizaron pruebas de potencia entregada. A una velocidad de viento de 2.5 m/s el aerogenerador comienza su operación con carga aplicada, llegando a un máximo de 0.15 W a una velocidad de 3.25 m/s, logrando estabilidad y posteriormente llegando a un punto de corte alrededor de los 4 m/s. (ver Fig. 9)

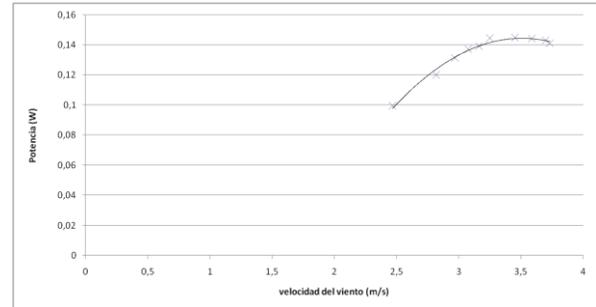


Fig. 10. Velocidad del viento vs Potencia entregada

Al analizar la potencia entregada frente a la potencia disponible del viento a las mismas velocidades que se realizaron las pruebas, como se observa en la Fig. 11, el máximo coeficiente de potencia (0.018) se da a la velocidad a la que el aerogenerador comienza a generar (2.5 m/s). Este valor no concuerda con el obtenido en la simulación del rotor Savonius (0.025) para una velocidad de 3 m/s (error de 28%), sin embargo el comportamiento del coeficiente de potencia es normal, puesto que después de llegar al máximo aprovechamiento de la energía, el aerogenerador puede inducir pérdidas por diferentes factores, como la vibración del sistema a medida que aumenta la velocidad del viento.

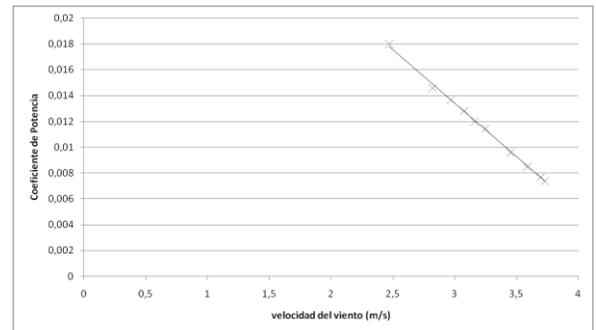


Fig. 11. Velocidad del viento vs Coeficiente de potencia

8.2. Rotor Savonius-Darrieus

Se construyó un prototipo del rotor Savonius-Darrieus, combinando el Savonius existente con aspas hechas bajo el principio de ala inflable. Se pretendían realizar las mismas pruebas que se realizaron con el Savonius, con el fin de verificar que el funcionamiento de las alas inflables como componentes de un rotor Darrieus es adecuada.

Al ensamblar el prototipo, sin embargo, se observó un grave problema estructural. Puesto que, al ser un sistema conformado principalmente por tela a tensión y elementos a compresión (fibra de vidrio), su peso se reduce a gramos, cumpliendo uno de los requerimientos de diseño, sin embargo, como no cuenta con muchos elementos estructurales rígidos, cuando el aerogenerador comienza su movimiento de rotación, las alas inflables se colapsan si el viento las enfrenta por el extradós.

El efecto anterior es contraproducente para el buen funcionamiento del rotor, puesto que hace que la estructura se frene y no se logre generar la energía suficiente para cargar equipos básicos. Por esta razón, el prototipo Savonius-Darrieus debe ser mejorado, de modo que tenga una estructura más rígida y su funcionamiento adecuado. Sin embargo esa modificación no será abarcada en este trabajo.

Debido a lo anterior, se realiza una segunda prueba con el rotor Savonius (de radio 40 cm), el cual se muestra en la Fig. 12, con el fin de evidenciar los efectos que tiene el cambio en las dimensiones con respecto al primer prototipo.



Fig. 12. Prototipo de aerogenerador tipo Savonius de radio 40 cm

En la Fig. 13 se ve el mismo funcionamiento del rotor de 30 cm de radio, alcanzando valores cercanos a 70 RPMs con velocidad del viento superior a 4 m/s.

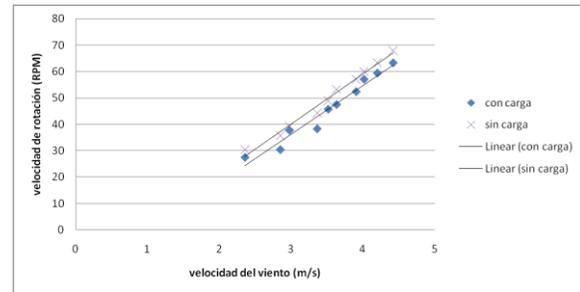


Fig. 13. Velocidad del viento vs Velocidad de rotación

También se presenta la gráfica del comportamiento del sistema cuando se le aplica una carga eléctrica, que es similar al comportamiento sin carga, similar al otro aerogenerador, llegando apenas a valores de rotación de 62 RPMs con velocidad del viento superior a 4 m/s, es decir una reducción de alrededor de 11%.

Esta disminución en la velocidad de rotación es menor a la que se evidenció en el primer prototipo, y esto puede ser aprovechado para generar más energía si se logra la estabilidad del sistema y la disminución de factores relevantes como la alta vibración inducida al tener un eje más largo emplazado en un extremo.

En la Fig. 14 se muestra el resultado al realizar pruebas de potencia entregada. A una velocidad de viento de 2.4 m/s el rotor Savonius comienza su operación con carga aplicada, llegando a un máximo de 0.135 W a una velocidad de 4.42 m/s, con tendencia a estabilizarse y posteriormente disminuir.

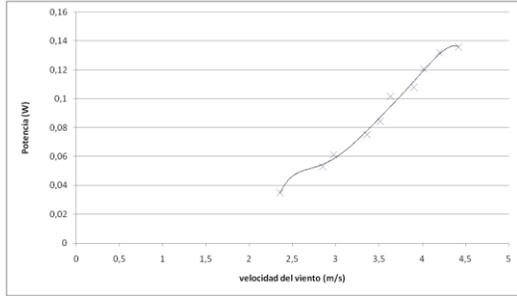


Fig. 14. Velocidad del viento vs Potencia entregada

Al analizar la potencia entregada frente a la potencia disponible del viento a las mismas velocidades que se realizaron las pruebas, como se observa en la Fig. 15, el máximo coeficiente de potencia (0.0045) se da a la velocidad a la que el aerogenerador comienza a generar (2.5 m/s). Este valor no concuerda con el obtenido en la simulación del rotor Savonius-Darrieus (0.02) para una velocidad de 3 m/s (error de 77%), similar al ensayo anterior.

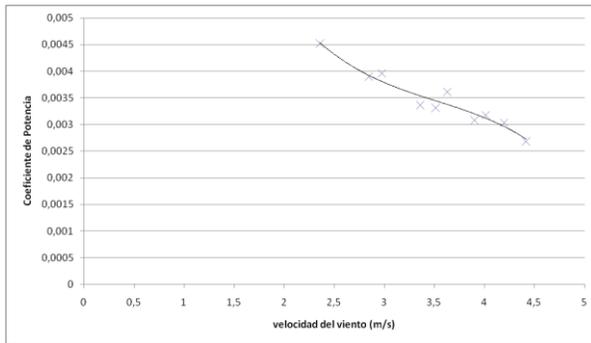


Fig. 15. Velocidad del viento vs Coeficiente de potencia

8.3. Comparación

Al comparar el comportamiento de las dos configuraciones del rotor Savonius, se evidencia que el rotor más pequeño (de radio 30 cm) genera valores de potencia y RPM's mayores (11% y 30% de diferencia

respectivamente). Esto se debe a diferentes factores, como el momento de inercia del rotor más grande con respecto al pequeño y el nivel de vibraciones alcanzado, puesto que al ser un prototipo con una altura mayor, la fuerza ejercida sobre el eje es mayor, y sumado al movimiento de rotación, se alcanza un movimiento oscilatorio indeseado, que frena al aerogenerador y por lo tanto se genera menos energía eléctrica.

Lo anterior influye directamente en la energía generada, se observa claramente que el error entre los valores de C_p teóricos y obtenidos en la prueba es de alrededor de 27% para el prototipo pequeño y de 70% para el prototipo grande. Por este motivo se considera que el prototipo pequeño podría alcanzar su nivel óptimo de generación (C_p de 0,02) si se mejoran los problemas estructurales, dándole mayor rigidez al eje, de modo que se disminuyan las vibraciones que producen la pérdida de potencia.

9. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL DISEÑO EN EL MERCADO

Actualmente los aerogeneradores portátiles están en etapa de estudio en gran parte del mundo, por lo que la mayoría de equipos existentes se encuentran en condición de prototipo de prueba, tal como el presentado en este trabajo.

Algunos de los aerogeneradores que se encuentra en comercialización son de eje vertical, sin embargo pocos operan a bajas velocidades de viento (como el Wellsee aunque su potencia máxima de 400W se logra con velocidades superiores a 15 m/s y peso de 15Kg), condición similar a la propuesta, además de que puede ser emplazado en diferentes lugares. En cuanto al costo, varía entre 100 a 300 dólares más los gastos de envío del equipo.

La principal ventaja del sistema propuesto en este trabajo, es que al ser un aerogenerador de eje vertical, es apto para emplazar incluso a nivel del suelo, y por lo tanto trabajar a bajas velocidades y sin depender de la dirección del viento.

El costo de construcción es una alta desventaja, alrededor de 800 USD, esto es alto pero depende de los materiales que se usen para el proceso. Sin embargo esta última característica podría disminuirse si se logra bajar costos de construcción mediante la utilización de materia prima nacional (tela y fibra de vidrio), volviendo el costo una ventaja de este prototipo en cuanto a otros equipos existentes. Otro factor importante es el dinamo, puesto que al ser importado, su costo es alto (alrededor de 600 USD), para esto se podrían buscar equipos más económicos dentro del país. Por el mismo hecho de ser de eje vertical, y considerado como tipo Savonius, es altamente ineficiente (C_p teórico de 0,02), además este tipo de aerogeneradores son difíciles de proteger de altas velocidades de corriente (tormentas), es decir, alta velocidad de rotación que puede inducir vibración, pérdida de potencia e incluso destrucción total del sistema.

10. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los requerimientos de diseño y los materiales presentes en la industria de cometas y parapentes, así como el concepto de tenseguridad y facilidad de armado, se realizó la búsqueda de materiales que se adaptaran, determinando que el material óptimo para la construcción del aerogenerador portátil es la tela (en este caso la tipo Rip-stop), caracterizada por su alta resistencia, baja porosidad y bajo peso. Adicionalmente, la rigidez de la estructura se logra por medio de varillas de fibra de vidrio, cuyas características las hacen ideales para soportar las cargas que soporta el aerogenerador al girar a velocidades de viento entre ligero y fresco.

Otro de los elementos fundamentales para el aerogenerador es el generador eléctrico, que para este caso se seleccionó el dinamo Schmidt Son Delux como generador principal del sistema, debido a características como su bajo peso, alta eficiencia (según estudios realizados en bicicletas) y la garantía que representa esta marca en el mercado internacional en comparación con otras marcas de dinamos y tipos de generadores, aunque su costo de adquisición es elevado por ser un elemento importado. Otra

desventaja del dinamo es su alto torque de arranque, lo que obliga al sistema a operar a velocidades de viento más altas de las esperadas, y aún se necesita un sistema de transmisión que mejore le eficiencia de la generación. En el futuro, para lograr disminuir costos, podría ser influyente la selección de un motor, generador o dinamo de fácil adquisición en el mercado nacional y que presente características similares a las que tiene el Son Delux, o se podría pensar en la construcción de un dinamo que presente menor torque de arranque y el sistema logre una eficiencia cercana a la deseada.

Teniendo en cuenta los requisitos de facilidad de transporte y ensamble, se diseñó una estructura colapsable con el concepto de tornillo de Arquímedes. El diseño propuesto es un aerogenerador de eje vertical que podría considerarse tipo Savonius no convencional (por lo que los valores de TSR teóricos no le aplican en un 100%). El tipo Savonius-Darrieus muestra posibles mejores prestaciones, sin embargo, cuando se realizaron pruebas de validación el diseño, se detectaron serios problemas estructurales que impidieron el correcto funcionamiento de este sistema, por este motivo se descartó la estructura tipo Savonius-Darrieus temporalmente, mientras se busca una solución final a estos problemas.

El prototipo Savonius genera energía eléctrica suficiente para cargar la batería de un teléfono celular, aunque necesita de un tiempo prolongado para lograrlo (más de 10 horas), lo que lo hace poco útil en la vida real, aunque para un campamento de emergencia podría ser la única solución para la generación de energía eléctrica. Su eficiencia (C_p) no logra los valores teóricos en aproximadamente un 27% de error, siendo un resultado no válido para la investigación y se debe buscar solución a los problemas para que el modelo funcione adecuadamente. Este valor del error puede ser causado por situaciones como la vibración (debida a que el eje se encuentra empotrado en un extremo), que genera altas pérdidas en el sistema, o también el sistema de transmisión entre el aerogenerador y el dinamo, puesto que si la relación de

transmisión aumenta, es probable que el torque en el dinamo disminuya y gire a mayor velocidad, generando mayor cantidad de energía eléctrica.

En el mercado actual, el sistema propuesto presenta la ventaja de ser un aerogenerador de eje vertical, por lo tanto es apto para emplazar incluso a nivel del suelo, y trabajar a bajas velocidades, sin depender de la dirección del viento. Sin embargo el prototipo presenta errores mayores al 20%, siendo poco útil actualmente, por lo que es necesario realizar mejoras estructurales, con el fin de alcanzar mayor eficiencia del sistema (más generación de energía), además de buscar la reducción de costos de producción, de modo que el producto final sea realmente asequible a las personas del común.

11. RECOMENDACIONES

Después de haber realizado simulaciones a ambos prototipos y su respectiva comparación, se puede asegurar que uno de los principales problemas de ambos es la vibración. Esto se debe principalmente a que el eje está empotrado en un extremo, por lo que la fuerza que genera el viento sobre las palas del aerogenerador es suficiente para generar una torsión y oscilación, y conseguir altas pérdidas de potencia, e incluso, con el tiempo, que el sistema colapse.

La recomendación consecuente es diseñar una estructura externa en la que se pueda empotrar el eje en el extremo superior (ver Figura 17), disminuyendo las vibraciones, y por consiguiente aumentar la eficiencia del aerogenerador.

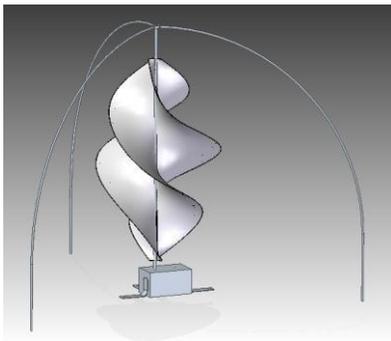


Fig. 16. Propuesta para nueva estructura

Como se mencionó anteriormente, para el rotor Savonius-Darrieus se necesitan hacer modificaciones estructurales, con el fin de conseguir más rigidez en las alas inflables y por lo tanto lograr una estabilidad en el sistema (que no se colapse). La solución podría encontrarse en dos posibilidades, que son:

- Estructura rígida.
- Alas inflables usando concepto de tensegridad (no parapente).

La primera opción podría hacer que el sistema dejara de ser fácilmente portable, aumentando el peso considerablemente, sin embargo se pueden buscar alternativas de materiales de bajo peso con el que se puedan construir perfiles internos, siguiendo el mismo concepto de ala inflable tipo parapente.

La segunda opción es la más viable respecto al diseño planteado inicialmente, e incluso el diseño original no cambiaría, pues consiste en crear alas de perfil completamente cerrado con una válvula para inflado manual, siendo rígidas desde que se procede al armado de la estructura y de este modo no colapsarían fácilmente.

Otra recomendación a tener en cuenta, es realizar nuevamente los cálculos para definir la transmisión de potencia entre el aerogenerador y el dinamo, esta relación podría ser de al menos 1:5, con el fin de disminuir el torque presente en el dinamo y aumentar su velocidad, para lo cual podría ser necesario un cambio de dimensiones en la caja contenedora y aumentaría el peso (no en gran medida), de modo que el arrastre generado no sea significativamente alto.

BIBLIOGRAFÍA

Alean Vanegas, D. J., & Herrón Gómez, D. (2007). Medellín, Antioquia, Colombia.

Barbato, K., Fredette, B., Kamon, K., & White, L. (16 de abril de 2004). Ribbon Propeller Drive. *Desing Proposal*.

Breuer, J., Ockels, W., & Luchsinger, R. H. (s.f.). An inflatable wing using the principle of Tensairity. Delf, Holanda: AIAA.

Danish Wind Industry Association. (1997). Recuperado el 27 de noviembre de 2012, de http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wres/index.htm

IDEAM, & UPME. (2006). *Atlas de viento y energía eólica de Colombia.* Bogotá: Imprenta nacional de Colombia.

Lingard, J. S. (1995). Ram-air parachute design. *13th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference.* Clearwater Beach: AIAA.

Martínez Molina, C. H., & Bohórquez Quiroz, J. M. (2009). *Generación eólica: conceptos básicos, situación actual y futura en Colombia y el mundo.* Medellín.

Tipos de energía. (febrero de 2006). Recuperado el 18 de septiembre de 2011, de <http://tipos-de-energia.blogspot.com/2006/02/energa-elica-tipos-de-generadores.html>

Word Press. (10 de octubre de 2008). Recuperado el 24 de abril de 2012, de <http://urjart.wordpress.com/2008/10/10/types-of-wind-energy-converters/>

ANEXO B

ANÁLISIS MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL DEL PERFIL NACA 0018 ABIERTO EN EL BORDE DE ATAQUE

Marcela Molina Cerezo, Sara Echeverry Jaramillo

Universidad Pontificia Bolivariana, Cq. 1 #70-01, of. 11-259, Medellín, Colombia.

Resumen: Este es el primer acercamiento al estudio del comportamiento de un aerogenerador de eje vertical (VAWT) portátil que utiliza el concepto de ala inflable en el diseño de sus aspas. Se realizó el análisis mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) de un perfil NACA0018 con una modificación (borde de ataque abierto para comportarse como ala inflable) enfrentado al viento a 3 ángulos de ataque (0° , 5° y 10°) y a baja velocidad (3m/s). Se observó el proceso de llenado de aire para verificar el arrastre generado durante este momento de modo que este valor no supere la fuerza del aspa y ésta logre avanzar en la dirección adecuada.

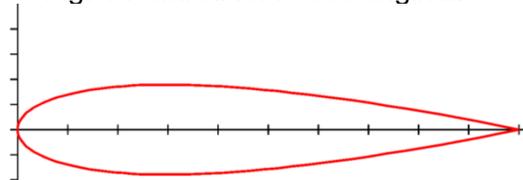
Palabras clave: CFD, VAWT, perfil aerodinámico, ángulo de ataque, sustentación, arrastre, C_l (coeficiente de sustentación), C_d (coeficiente de arrastre).

1. INTRODUCCIÓN

El perfil NACA0018, debido a sus propiedades estructurales y aerodinámicas, es usado normalmente en aerogeneradores de eje vertical (que giran por sustentación) (VAWT) como rotores Darrieus en H. (Ref. VWA¹)

La siguiente imagen (Fig. 1) muestra la geometría del perfil NACA0018 y seguidamente (Fig. 2) el perfil modificado. La modificación realizada al perfil original para efectos del llenado de aire fue abrir el borde de ataque hasta 2% de la cuerda (para este caso 4mm).

Fig. 1 Perfil NACA 0018 original.

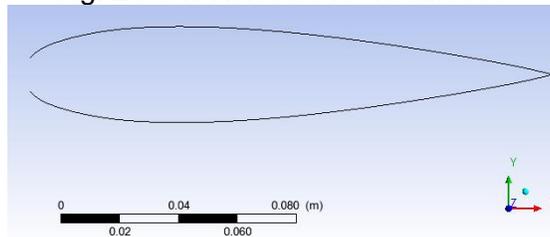


[AID 2011²]

¹ Vertical Windkraft Anlagen (VWA) <<http://vertikal-windkraft-anlagen.de/produkte/h-rotor-rotorprofil-symmetrisch-naca0018/>> consultada el 7/10/11

² Airfoil Investigation Database (AID) <<http://www.worldofkrauss.com/>> consultada el 7/10/11

Fig. 2 Perfil NACA0018 modificado



[Autoría propia]

Los datos principales del perfil NACA0018 original son:

Tabla 1. Datos principales perfil NACA0018

Thickness:	18.0%
Camber:	0.0%
Trailing edge angle:	21.7°
Lower flatness:	1.9%
Leading edge radius:	3.6%
Max C_L:	1.099
Max C_L angle:	15.0
Max L/D:	33.894
Max L/D angle:	5.5
Max L/D C_L:	0.696
Stall angle:	-1.099
Zero-lift angle:	0.0

[AID 2011]

Mediante CFD se pueden simular y analizar problemas de ingeniería que involucran fenómenos físicos de movimiento de fluidos, reacciones químicas, transferencia de calor y procesos relacionados. Mediante este es posible predecir el comportamiento del fenómeno alrededor de un cuerpo dado inmerso en un fluido. En este estudio se utilizó el software Ansys Fluent, que permite realizar todo el proceso, partiendo desde la creación de la geometría, mallado del sistema, simulación del fenómeno y post-procesamiento de los resultados.

En las siguientes secciones se explica detalladamente la metodología de trabajo, el estudio de malla, los resultados y conclusiones obtenidos en este estudio.

2. METODOLOGÍA

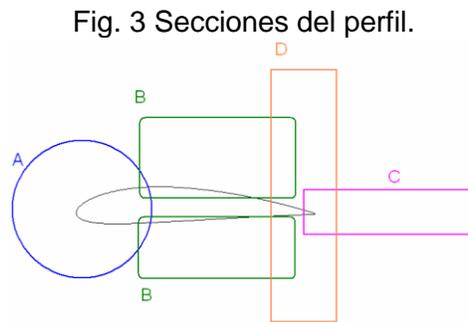
Para realizar el estudio del perfil NACA0018 modificado, se siguió una metodología basada en la usada por *Bernal et. al.* que para nuestro caso consistió en un estudio básico del perfil original, comparando con datos registrados, para así validar los resultados obtenidos mediante Ansys Fluent y posteriormente ejecutar el análisis del perfil modificado. Antes de lo anterior, se debe realizar un estudio de la convergencia de malla, lo cual es fundamental para lograr resultados concordantes con la teoría de perfiles, logrando un bajo margen de error.

3. ESTUDIO DE MALLA

Las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el movimiento de fluidos normalmente no son adaptables para soluciones analíticas. Para analizar el movimiento de los fluidos, el dominio debe ser dividido en pequeños subdominios dependientes entre sí (que pueden ser tetraedros o hexaedros en 3D, ó cuadriláteros y triángulos en 2D llamados celdas o elementos, y el conjunto es la malla) y las ecuaciones pueden ser resueltas dentro de cada uno de sus límites. Pero debe tenerse mucho cuidado en las interfaces entre subdominios, porque debe garantizarse una continuidad, de modo que las aproximaciones de la solución al interior de varias regiones puedan unirse y obtener un resultado consecuente a lo largo de todo el dominio.

Para la simulación del problema se usaron dos tipos de mallas: estructurada y no estructurada. La estructurada tiene una conectividad regular de elementos que permite la conservación de un espaciamiento uniforme. Esta característica limita la selección de elementos cuadriláteros para análisis en 2D. A pesar de que este tipo de mallas son difíciles de generar, debido a la irregularidad en la mayoría de geometrías, son las que mejor se acomodan para el análisis de flujo a elevados números de Reynolds usando el método de volúmenes finitos. Mientras una malla no estructurada tiene conectividad de elementos irregular y aunque es el tipo de malla más usado en la industria, tiene menor eficiencia que las estructuradas, debido al tiempo requerido en la adecuación de la geometría (Bernal et. al. 2007). Para nuestro estudio se utilizó la malla estructurada, debido a que (después de realizar varias simulaciones comparativas) los resultados obtenidos fueron más acertados que los arrojados por la malla no estructurada, a pesar de que nuestro problema no involucra altos números de Reynolds.

En la siguiente imagen (Fig. 3) se pueden observar las regiones de un perfil según Bernal et. al. y con base en estas secciones, se realizó el refinamiento de la malla usada para este estudio, para el cual los refinamientos más importantes fueron en las secciones A (borde de ataque), B (intradós y extradós) y C (estela de flujo), debido a que para este caso son las secciones más críticas.

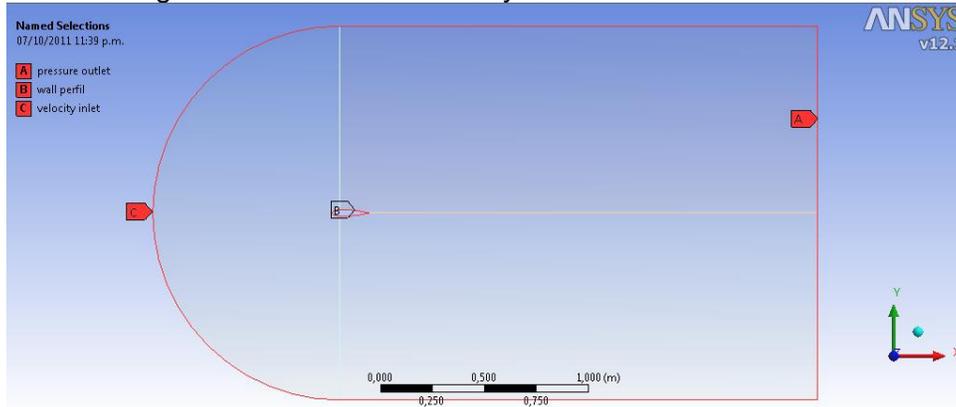


[Bernal et. al. 2007]

La sección A corresponde al borde de ataque abierto, el cual recibe el impacto directo del flujo de aire, inicialmente generando el llenado del perfil y luego presentando altos gradientes en la presión y velocidad. La sección B representa las superficies donde se presentan los fenómenos más importantes en el estudio de un perfil: separación del flujo de aire. Y la sección C es la región donde el fluido que viaja por el extradós se interseca con el que viaja por el intradós, creando una zona de “vacío” en la capa límite, ésta influye en la generación de arrastre del perfil (Bernal et. al. 2007).

Se creó entonces una malla estructurada que lograra registrar los cambios ocurridos en el aire alrededor del perfil. Para esto se utilizó la herramienta “edge sizing” sobre las líneas observadas en la siguiente imagen (Fig. 4) y sobre la superficie del perfil. La cantidad de elementos por zona se definió de forma experimental hasta que el resultado fue aceptable.

Fig. 4 Geometría a enmallar y condiciones de frontera.



[Autoría propia]

El “sizing” de las opciones generales de malla se modificó para lograr un crecimiento de malla menos abrupto y que los elementos tuvieran las mejores características de calidad, relación de aspecto y oblicuidad (definitivos para la convergencia de la solución), se usó entonces un “sizing” con crecimiento de 1.015 para todas las mallas usadas, pero adicionalmente el “edge sizing” en cada zona definió la cantidad de elementos de la malla. Para lograr ver la convergencia de malla, se hizo un estudio de 3 mallas con cantidad de elementos diferente, se utilizó el perfil original a un ángulo de ataque de 0°, para el cual el valor del Cl es 0 por ser un perfil simétrico. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 2. Estudio de malla para el perfil NACA0018

Malla	número elementos	cl
1	6000	-0,1
2	10400	0,16
3	15000	0,47
4	21600	-0,0053

[Autoría propia]

Evidentemente en las 3 primeras mallas la solución no convergió (ver tabla 2.), esto se debe principalmente a los “edge sizing” y “bias factor” utilizados en cada una, por lo tanto se decidió hacer una nueva malla (4) con “edge sizing” y “bias factor” diferentes, y se obtuvo un resultado más acertado (teniendo en cuenta que en esta última se utilizaron residuales de 1e-6 como criterio de convergencia). Se utilizó esta malla para todas las simulaciones del perfil cerrado.

Para las simulaciones del perfil modificado, se utilizó una malla similar a la anterior pero con zonas diferentes debido a la geometría de perfil abierto. Para analizar la malla simplemente se comparó entre la estructurada y la no estructurada:

Tabla 3. Estudio de malla para el perfil NACA0018 modificado

Malla	número elementos	cl
Estructurada	22238	0,00595
No estructurada	92222	-0,00927

[Autoría propia]

Es de notar que aunque la malla no estructurada tiene mayor número de elementos (ver tabla 3.), la solución es más acertada para la malla estructurada, por lo tanto se escogió definitivamente utilizar la malla estructurada para todas las simulaciones.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se observan las gráficas (Fig. 5 y 6) que indican el comportamiento principal del perfil NACA0018 original:

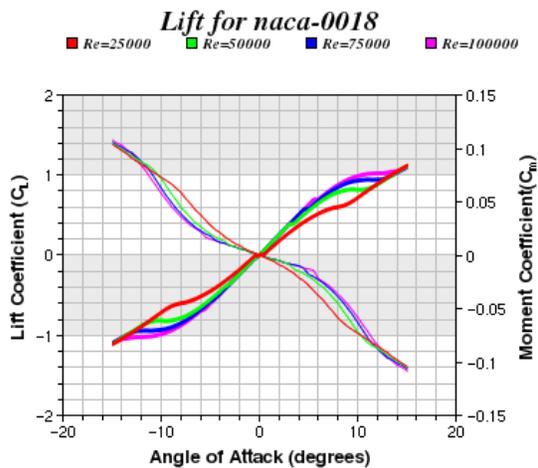


Fig. 5 Gráfica C_l vs α y C_m vs α .
[AID 2011]

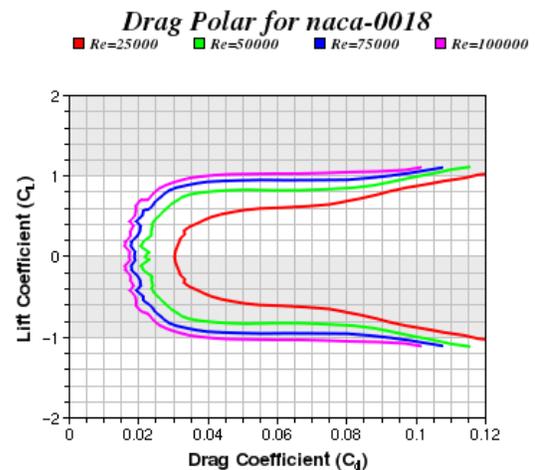


Fig. 6 Gráfica C_l vs C_d
[AID 2011]

Utilizando los datos de atmósfera estándar y una velocidad del viento de 3m/s con una cuerda de perfil de 0.18m, se calculó un Reynolds de 37000. Para poder realizar comparaciones y validar los resultados obtenidos mediante Ansys Fluent, se escogieron datos de las gráficas anteriores para Reynolds entre 25000 y 50000, teniendo en cuenta que por la topología colombiana es muy probable que la velocidad y condiciones atmosféricas varíen considerablemente de un lugar a otro.

Tabla 4. Comparación de resultados del perfil NACA0018 original

	α	Cl	%e Cl	Cd	%e Cd
Simulación	0°	-0,00534		0,1576	530,260
Dato teórico		0		0,025	
Simulación	5°	0,491	1,803	0,177	491,167
Dato teórico		0,5		0,03	
Simulación	10°	0,929	9,346	0,235	291,297
Dato teórico		0,85		0,06	

[Autoría propia]

Es evidente que los datos de C_d son completamente diferentes entre los teóricos y los obtenidos mediante Ansys Fluent (*ver tabla 4*), lo cual es muy común cuando se realizan este tipo de simulaciones, una recomendación a tener en cuenta puede ser revisar la gráfica de Y^+ para verificar el tamaño de malla en la zona de capa límite y desprendimiento, lugar crítico para este fenómeno. Para el caso del CI, los datos son bastante similares, y el error es aceptable (<20%).

También se compararon los datos obtenidos mediante Ansys Fluent con los obtenidos mediante el software X-Foil, pero se evidenciaron diferencias de hasta 200% en el valor del CI, el error es introducido posiblemente en el método de paneles usado por X-Foil, por lo tanto, no se tuvo en cuenta.

Comparando los resultados obtenidos sobre el perfil modificado con los obtenidos con el perfil original (*ver tabla 5*), podemos observar que aún existe una gran diferencia en los valores de C_d , incluso llegando a ser menor el del perfil abierto, por lo tanto podemos concluir que las simulaciones quizá no habían convergido o deben cambiarse los parámetros de malla para obtener un mejor resultado.

Tabla 5. Comparación de resultados entre el perfil original y el modificado

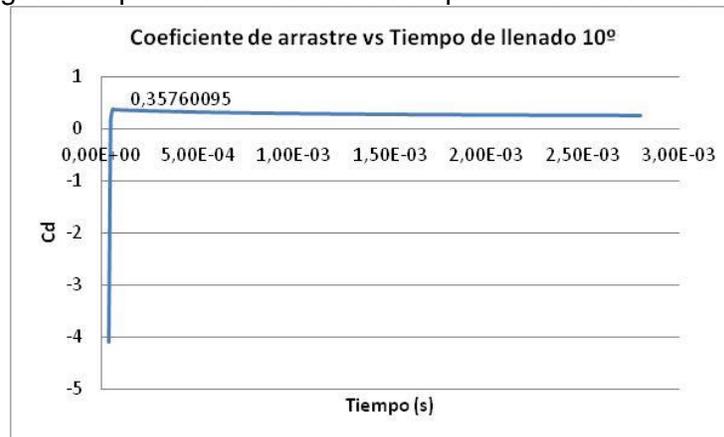
perfil	α	CI	%e CI	C_d	%e C_d
modificado	0°	0,00595	11,425	0,0689	56,257
original		0,00534		0,1576	
modificado	5°	0,486	1,039	0,098	44,745
original		0,491		0,177	
modificado	10°	0,9006	3,099	0,1802	23,266
original		0,929		0,235	

[Autoría propia]

También se realizó el estudio del llenado del perfil a los 3 ángulos mencionados anteriormente, para poder verificar que la fuerza generada por el arrastre en el instante del llenado no fuera superior a la fuerza de sustentación y avance del perfil, de modo que el aerogenerador pueda romper la inercia en el sentido de giro adecuado.

En la siguiente imagen (*Fig. 7*) se aprecia que el arrastre inicial es muy alto pero su duración es muy corta mientras logra bajar y estabilizarse en el valor del perfil cerrado:

Fig. 7 Comportamiento del C_d en el proceso de llenado a 10°



[Autoría propia]

5. CONCLUSIONES

- Se logró observar mediante las simulaciones que el perfil generó sustentación, lo cual lo hace óptimo para ser utilizado en las aspas de un VAWT. Para esto se realizaron simulaciones a 0°, 5° y 10° del ángulo de ataque, y a partir de estos resultados, se podrían hacer algunas modificaciones sobre el perfil (por ejemplo reducción del espesor máximo) para mejorar las prestaciones del mismo.
- Es posible que mediante modificaciones en el modelo de transición y la adecuación de parámetros, se reduzca el error en el valor del coeficiente de arrastre hasta el punto en que se encuentre dentro de parámetros aceptables (<20%) sin modificar el resultado del coeficiente de sustentación y logrando una buena solución y visualización de los fenómenos obtenidos en los resultados.
- Se pudo evidenciar que el programa X-FOIL, a pesar de ser una base de trabajo muy útil para la comparación y selección de perfiles, no fue una fuente certera de información, posiblemente debido a un error introducido por el método mediante el cual este trabaja (Método de Paneles). Por lo tanto se buscó una forma diferente de obtener los datos teóricos.
- Durante la generación de malla se podrían manejar más regiones de interés sobre el perfil, de tal modo que se tenga un mejor refinamiento en cada zona, verificando siempre el valor del Y+, la calidad de elementos, la relación de aspecto y la oblicuidad, con el fin de lograr minimizar al máximo el porcentaje de error en los resultados obtenidos. Es recomendable entonces realizar de nuevo el estudio para la obtención de datos correctos.
- Durante el llenado del perfil se pudo observar que inicialmente el arrastre crece muy rápido en un instante pequeño, para luego disminuir gradualmente hasta alcanzar el arrastre de un perfil cerrado. Este arrastre puede afectar el sentido de rotación del aerogenerador si la fuerza de sustentación no es suficiente para romper la inercia que lo mantiene estático. Es fundamental entonces, asegurarse de que las aspas del aerogenerador enfrenten al viento con un ángulo de ataque mayor a 0°, ya que a este ángulo no se genera sustentación, por ser un perfil simétrico, por lo tanto la rotación se iniciaría en sentido opuesto.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Bernal, A, Orrego, S, "Diseño del ala para un vehículo aéreo no tripulado" Universidad Eafit, Escuela de ingenierías, Departamento de ingeniería mecánica, Medellín, 2007

Airfoil Investigation Database (AID) <<http://www.worldofkrauss.com/>> consultada el 7/10/11

Vertical Windkraft Anlagen (VWA) <<http://vertikal-windkraft-anlagen.de/produkte/h-rotor-rotorprofil-symmetrisch-naca0018/>> consultada el 7/10/11

ANEXO C

ANÁLISIS MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL DE 3 PERFILES NACA 0018 ABIERTOS EN EL BORDE DE ATAQUE UBICADOS A 120°

Marcela Molina Cerezo¹, Sara Echeverry Jaramillo²

Universidad Pontificia Bolivariana, Cq. 1 #70-01, Medellín, Colombia.

Resumen: Este es un acercamiento al estudio del comportamiento de un aerogenerador de eje vertical (VAWT) portátil que utiliza el concepto de ala inflable en el diseño de sus aspas. Se realizó el análisis mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) de tres perfiles NACA 0018, con una modificación (borde de ataque abierto para comportarse como ala inflable), ubicados a 120° y considerando una baja velocidad del viento (3m/s). Se observó el torque y la potencia generada por el generador.

Abstract: This is an approach to the study of the behavior of a vertical axis wind turbine (VAWT), which uses the portable inflatable wing concept in the design of its blades. The analysis was performed using computational fluid dynamics (CFD) of three NACA 0018 profiles, with a modification (open edge to behave like inflatable wing), located at 120° and considering a low wind speed (3m/s). The torque and power generated were observed.

Keywords: CFD, VAWT, aerodynamic profile, angle of attack, lift, drag, Cl (lift coefficient), Cd (drag coefficient).

1. INTRODUCCIÓN

Un aerogenerador es un generador eléctrico, el cual es movido por una turbina accionada por el viento, es por esto que recibe el nombre de turbina eólica. Los aerogeneradores han sido usados desde mucho tiempo atrás, una de sus aplicaciones eran los molinos de viento, en este caso eran usados para fines de molienda y para la obtención de harina.

En la actualidad existen diferentes tipos de aerogeneradores y su clasificación puede estar dada dependiendo de su potencia,

disposición de su eje de rotación, el tipo de generador que usa, las velocidades y las condiciones con las que opere.

Los aerogeneradores se pueden clasificar básicamente en dos:

- Los HAWT son los más utilizados y de mayor potencia.
- Los VAWT no son tan usados como los HAWT pues se han realizado numerosos prototipos, pero por razones técnicas y económicas su implantación en la práctica es muy

¹ Correo: marcela.molina@alfa.upb.edu.co

² Correo: sara.echeverry@alfa.upb.edu.co

limitada. Se caracterizan por que el viento los roza perpendicular a la dirección de su eje, garantizando en todo momento que giren respecto a la velocidad del aire circundante, por lo tanto estos aerogeneradores no dependen de una orientación alguna para producir electricidad siempre y cuando exista viento.

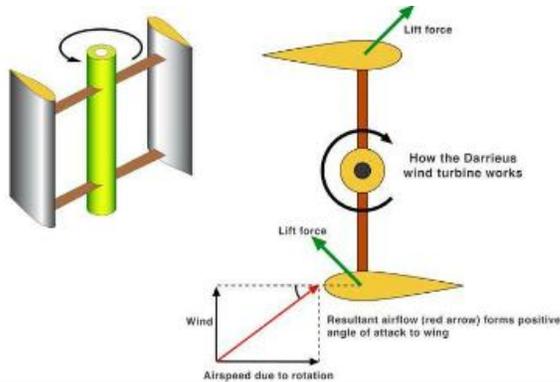


Fig 1. Aerogenerador Darrieus
[PA]

En la figura anterior se observa el funcionamiento básico de un aerogenerador Darrieus, que es básicamente por el efecto de la sustentación.

Buscando solucionar el problema mencionado, se desea diseñar y construir un aerogenerador de eje vertical (de baja velocidad), bajo peso y facilidad de transporte, combinando los conceptos generales de aerogeneradores y ala inflable.

2. METODOLOGÍA

En un estudio realizado anteriormente se observó el comportamiento de un solo perfil a diferentes ángulos de ataque para la misma velocidad del viento, de modo que se observara el proceso de llenado y verificar cómo éste afecta el arrastre del perfil y su facilidad para iniciar el movimiento en el sentido adecuado.

Partiendo de las conclusiones a las que se llegó en ese estudio, se realizaron nuevas simulaciones teniendo en cuenta los valores del Y Plus, con el fin de lograr minimizar al máximo el porcentaje de error en los resultados que se esperaban obtener. Se

logró una malla de 150000 elementos, pero debido a que éstos quedaban muy deformados, no se logró el objetivo. Se realizaron varias simulaciones para diferentes mallas, pero el estudio no fue exitoso así que se prosiguió a iniciar con el nuevo estudio.

El análisis de esta entrega con las configuraciones planteadas se hizo en 2 dimensiones.

3. GEOMETRÍA, MALLA Y SIMULACIÓN

Para la geometría se usó el mismo perfil que se había trabajado anteriormente (NACA 0018) con el borde de ataque abierto. Se copió este mismo perfil tres veces y se ubicaron a 120° , estos se cerraron en dos circunferencias concéntricas (diferentes diámetros), las cuales se usaron como malla rotatoria. Todo lo anterior se enmarcó en un volumen de control lo suficientemente grande para que el fluido y el sólido interactuaran libremente.

Se usó una malla no estructurada basada en triángulos. Sobre los perfiles se hizo un refinamiento para lograr una malla adecuada (malla rotatoria) y sobre las otras superficies se realizaron diferentes refinamientos según la zona de interés. Se logró obtener 161108 elementos.

Sobre el volumen de control se usó una malla con menos elementos y por lo tanto más grandes, con el fin de reducir cómputo.

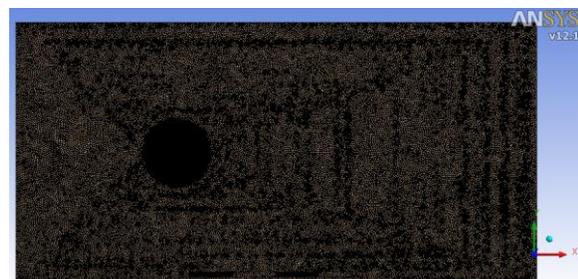


Fig 2. Vista de la Malla de toda la geometría.
[Autoría propia]

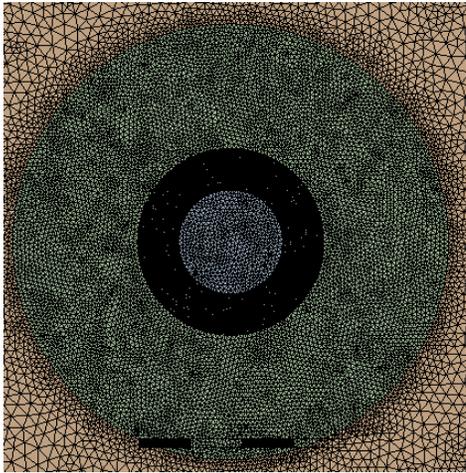


Fig 3. Acercamiento a la Malla.
[Autoría propia]

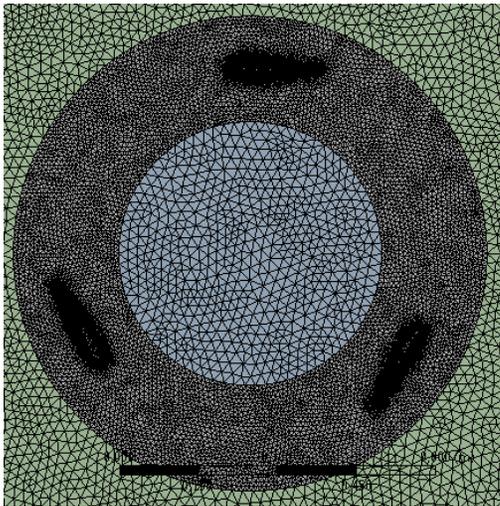


Fig 4. Acercamiento sobre la zona de interés.
[Autoría propia]

Para la simulación se usaron los siguientes parámetros:

En "General", se trabajó con el modelo basado en presión, este modelo es usado para flujos incompresibles y medianamente compresibles. Se seleccionó una velocidad de formulación absoluta, ya que este es recomendable cuando se tienen magnitudes bajas de velocidad, y se trabajó en estado transitorio para un modelo en 2D.

En "Models", se trabajó un modelo de viscosidad k-omega SST, con este mismo se venía trabajando en las simulaciones de estudios anteriores.

En "Cell Zone Conditions", se creó la malla móvil y se agregó la velocidad rotacional que tendrá el aerogenerador (34.2857 rad/seg),

conociendo una velocidad de viento de 3m/seg y un radio para el aerogenerador de 0.35m.

La velocidad del viento de 3m/seg se ingresó en componentes, en "Boundary Conditions".

En "Reference Values", se consideraron los siguientes parámetros:

Area.....	1
Density.....	1.225
Dephy.....	1
Enthalpy.....	0
Length.....	1
Pressure.....	0
Temperature.....	288.16 k
Velocity.....	1
Viscosity.....	1.7894e-5
Ratio of specific heats.....	1.4

En "Solution Method", en Scheme se seleccionó SIMPLE, que aunque normalmente es usada para simulaciones en estado estacionario, en este caso se usaron time step muy pequeños, para lo cual PISO sería un incremento computacional innecesario, por lo que se consideró usar SIMPLE. En Gradient se usó Green Gauss node based que tiende a ser más exacto que el esquema cell-based para este tipo de mallas. En Pressure se usó Standard, y se trabajó con First order upwind para el Momentum, Turbulent kinetic energy, Specific dissipation rate y Transient formulation, se usó este esquema puesto que inicialmente se simuló con el de segundo orden y se obtuvieron problemas de convergencia.

En "Monitors" se seleccionó Momento para lograr un historial del coeficiente de momento y calcular el torque del generador.

Los parámetros usados en "Run Calculation" fueron, 0.0005 para el tamaño de time step y de 500 para número de time steps inicialmente, pero luego se hizo una simulación para 1500 time steps ya que en la simulación inicial no se logró la estabilidad del sistema.

4. ECUACIONES GOBERNANTES

Para los análisis de este estudio se usaron las siguientes ecuaciones:

$$P = (1/2)\rho V^3 A \quad (1)$$

$$P = T\omega \quad (2)$$

$$C_p = P/P_{ideal} \quad (3)$$

$$TSR =$$

$$V_{tan}/V_{viento} = \omega r / V_{viento} \quad (4)$$

$$T = C_m (1/2)\rho V^2 AL \quad (5)$$

De donde:

V: velocidad (m/seg) (valor de referencia)

A: área (m²) (valor de referencia)

L: longitud (m) (valor de referencia)

ρ: densidad

P: presión

T: torque

ω: velocidad angular (rad/seg)

V_{tan}: velocidad tangencial (m/seg)

V_{viento}: velocidad del viento (m/seg)

r: radio del aerogenerador (m)

TSR: Tip Speed Ratio

C_m: coeficiente de momento

El TSR es la relación entre la velocidad tangencial (en la punta del perfil) y la velocidad del viento. Considerando un valor de TSR constante e igual a 4 según la figura 5, nos quedó para nuestras condiciones:

$$V_{tan} = V_{viento} \cdot TSR = 3 \cdot 4 = 12 \text{ m/seg} \quad (6)$$

Con el dato obtenido en (6) se halló la velocidad angular a la cual va a trabajar el aerogenerador portátil, despejando:

$$\omega = \frac{(TSR \cdot V_{viento})}{r} = \frac{(4 \cdot 3)}{0.35} = 34.2857 \text{ rad/seg}$$

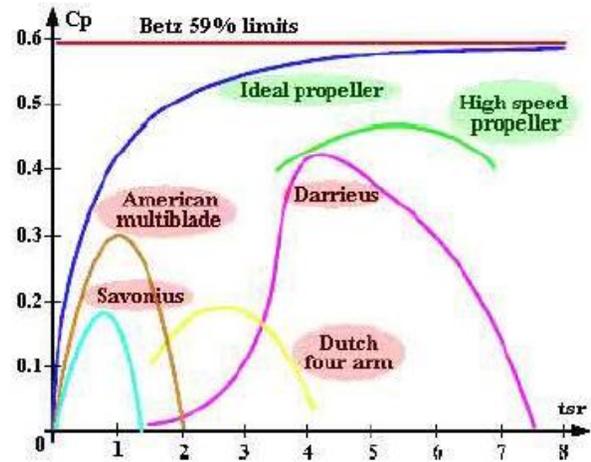


Fig 5. Grafica del TSR Vs. Cp, para diferentes aerogeneradores. [OP]

Del la imagen anterior (Figura 4), se puede ver el comportamiento de los aerogeneradores en funcion del TSR.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Inicialmente se realizó una simulación para 500 Timesteps, en la cual no se logró la estabilidad del sistema. Esto se pudo observar tanto en el video de los contornos de presión estática como en la gráfica de convergencia del Cp (fig 6.), donde se aprecia que el sistema tiende a estabilizarse en valores negativos de torque.

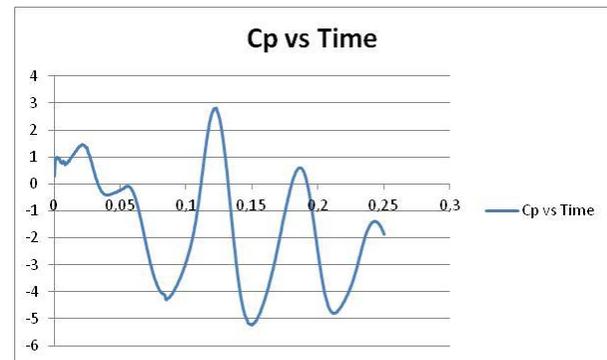


Fig 6. Cp Vs. Time (500 timesteps) [Autoría propia]

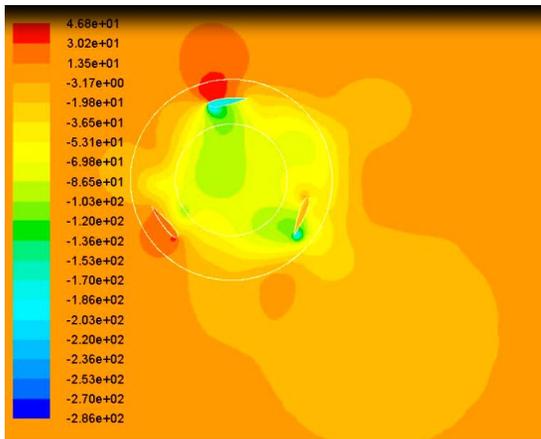


Fig 7. Punto crítico al inicio de la simulación
[Autoría propia]

En la figura 7 se observa que inicialmente los valores de presión no estaban estabilizados, pues no puede existir una presión menor dentro de los perfiles a la presión exterior del sistema, esto ocasionaría un colapso de la estructura e impediría el llenado de la misma.

Luego de este primer acercamiento, se realizó una segunda simulación para 1500 Timesteps, en la cual se logró la estabilidad del sistema y, como se observa en la figura 8, se lograron torques negativos.

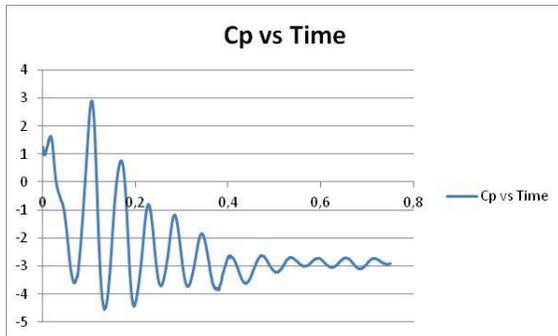


Fig 8. Cp vs Time (1500 timesteps)
[Autoría propia]

En los contornos de presión se observó que los perfiles logran un llenado durante toda la trayectoria aproximadamente uniforme, aumentando la presión según su posición, pero manteniéndose por encima de 10Pa a partir de un tiempo de 0.3 segundos.

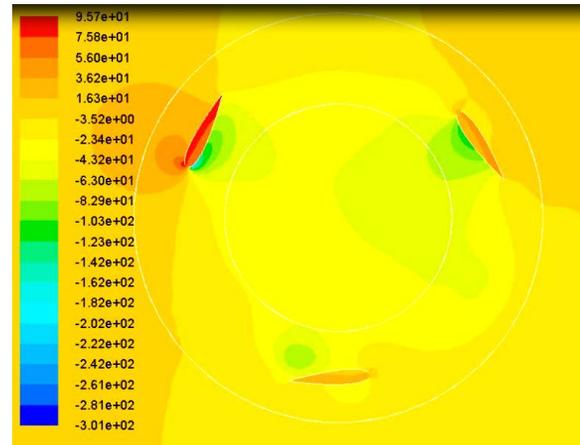


Fig 9. Contornos de presión para 0.3seg
[Autoría propia]

6. CONCLUSIONES

- Para un Darrieus tradicional, la parte superior e inferior de la pala no contribuyen al torque, y a veces generan torque negativo porque el radio local y el TSR son muy pequeños.
- También se conoce que para los aerogeneradores Darrieus el torque de arranque es cero y a bajos valores de TSR es incluso negativo. Esto significa que es necesario un motor especial para arrancar el rotor.
- Los valores negativos de torque podrían significar también que el aerogenerador rotará en sentido contrario al establecido, debido a la fuerza de arrastre generada en los perfiles, se recomienda entonces realizar un estudio a fondo de este resultado para lograr definir la eficiencia del generador.
- Al usar un perfil de alto espesor (NACA0018) a un Reynolds bajo (baja cuerda y baja velocidad de viento), se obtienen valores más altos del mínimo Cd/Ci que los obtenidos en perfiles delgados, y esto tiene una influencia negativa en el valor del Cp. Debido a este efecto, los rotores Darrieus sólo tienen un Cp aceptable a baja velocidad si son lo suficientemente grandes.

- Se considera entonces realizar el estudio con un perfil que tenga un espesor menor y pueda reducir el efecto mencionado anteriormente, y así lograr una eficiencia aceptable.

BIBLIOGRAFÍA

<<http://tipos-de-energia.blogspot.com/2006/02/energa-elica-tipos-de-generadores.html>> consultada el 18 de septiembre de 2011.

Other Power [OP]:

<<http://www.otherpower.com/winbasics2.html>>, consultado el 1 de Noviembre de 2011.

<<https://netfiles.uiuc.edu/mragheb/www/NPRE%20475%20Wind%20Power%20Systems/Optimal%20Rotor%20Tip%20Speed%20Ratio.pdf>>, consultado el 12 de Noviembre de 2011.

Presentación aerogeneradores [PA]:

<<http://www.slideshare.net/piea/presentacin-aerogeneradores-2010-final>>, consultado el 14 de Noviembre de 2011.

<[http://www.hetronix.eu/files/KD215_\(Darreus_design_fails\)_Kragten.pdf](http://www.hetronix.eu/files/KD215_(Darreus_design_fails)_Kragten.pdf)>, consultado el 15 de noviembre de 2011

ANEXO D

FECHA: _17/06/2013

INFORME AVANCE

INFORME FINAL

Título del proyecto: Aerogenerador Portátil de eje vertical

Nro. de radicado: 907A-01/12-57

Nombre del Grupo/Facultad: Ingeniería Aeronáutica

Unidad Académica: Ingeniería Aeronáutica

Nombre del investigador/Docente principal: César Nieto Londoño

Costo total del proyecto: COP \$20.339.986

Entidades Financiadoras: UPB, CDI

Duración del proyecto (meses):12 **Inició:**Enero 2012

Terminó:

Resumen

Los desastres naturales o accidentes de gran tamaño provocados por la humanidad vienen acompañados por una precariedad o falta total de suministro de electricidad, entre otros servicios básicos. Esto tiene varios efectos sobre las personas afectadas por este tipo de eventos y el personal de rescate que llega a estos lugares a prestar sus servicios. Entre otros, la seguridad, confianza y autoestima de las personas se pueden ver favorecidas notablemente al proveer este servicio básico durante estos momentos de desastre. Además, el tener acceso a sistemas de información básicos, mediante la conexión de radios de banda corta, permiten prevenir fatalidades adicionales asociadas a replicas de las factores que pudieron dar lugar al desastre.

En la actualidad, se emplean sistemas fotovoltaicos o impulsados por el hombre, para cargar los sistemas de iluminación y comunicación en estos lugares. Los primeros tienen inconveniente de la disponibilidad del fuente de energía (sol) en las horas de la noche, mientras que los segundos, requieren del esfuerzo de las personas, que probablemente no se encuentren en condiciones para realizarlo por escasez de alimentos o efectos físicos y/psicológicos de evento natural al que han sido sometidos.

El territorio colombiano se caracteriza por tener grandes diferencias de altura debido a las cordilleras que lo atraviesan, estas alturas hacen que el viento se distribuya sobre los campos a diferentes velocidades y en direcciones aleatorias (debido a que se generan térmicas en zonas de alta montaña). Teniendo presente los factores anteriores y con el fin de proveer un dispositivo portátil y que puede operar bajo diversas condiciones de viento, en el presente proyecto se busca desarrollar el diseño conceptual y realizar un prototipo de un aerogenerador portátil para bajas velocidades. El aerogenerador portátil a desarrollar con este proyecto, busca suplir suministros eléctrico para necesidades básicas de iluminación y comunicación en campamentos transitorios, con el fin de proveer condiciones mínimas de confort en estos sitios. Las consideraciones a tener durante el desarrollo del dispositivo, serán las de portabilidad, facilidad de armado, bajo peso, factibilidad de fabricación y aceptación del mercado. Los impactos social, ambiental e innovador de la propuesta son

de gran consideración, dado que se espera proveer de un elemento que puede facilitar las condiciones de rescate mediante la aplicación de un sistemas basado en el uso de fuentes alternas de energía.

Comparación entre los Objetivos Planteados y Resultados/ Productos obtenidos:

Objetivos Planteados y Resultados/ Productos presupuestados:	Objetivos Planteados y Resultados/ Productos obtenidos:
<p>Realizar una búsqueda bibliográfica que permita establecer los elementos necesarios para el diseño y fabricación de aerogeneradores portátiles a partir de la unión de los conocimientos de materiales y aerodinámica para alas inflables, mecanismos y configuración de estructuras deformables y generadores eléctricos para revoluciones de giros variable.</p> <p>Seleccionar los materiales de las aspas y la estructura del aerogenerador portátil a partir de los elementos identificados para el diseño de alas inflables y estructuras deformables.</p> <p>Diseñar y dimensionar una configuración para las aspas y la estructura del aerogenerador portátil teniendo presente los requerimientos de facilidad de ensamble y transporte.</p> <p>Seleccionar el generador eléctrico más apropiado para la operación bajo condiciones de velocidad de giro variable, teniendo presente los requerimientos de transporte, demanda de carga y variabilidad de velocidad del viento.</p> <p>Fabricar un prototipo funcional de aerogenerador portátil con palas de ala inflable para operación bajo velocidades bajas de viento y realizar pruebas de campo para validar los parámetros de diseño y operación diseño.</p>	<p>Estado del arte del problema, conocimientos acerca de aerogeneradores y alas inflables. Se realizó un primer diseño de aerogenerador estudiado en simulaciones con herramienta CFD. Faltan simulaciones por realizar y validar.</p> <p>Se seleccionaron los materiales para el aerogenerador.</p> <p>Se realizó el diseño del prototipo de aerogenerador tipo Savonius a ser fabricado.</p> <p>Se seleccionó la dinamo SON XS de la marca SCHMIDT como la más apropiada para el aerogenerador.</p> <p>No se ha fabricado el prototipo.</p>
PORCENTAJE DE CUMPLIMIENTO	60%

Comparación entre el cronograma base y el cronograma real

Tiempo Presupuestado:	Tiempo Real:
12 meses	
PORCENTAJE DE EJECUCIÓN	33%

Comparación entre el presupuesto base y el presupuesto real

Costo Presupuestado:	Costo Real:
COP \$20.339.986	
PORCENTAJE DE EJECUCIÓN	10%

Debilidades: No se cuenta con acceso rápido a materiales y equipos para configuración del prototipo, dado que en su mayoría son importados	Oportunidades: No se han encontrado equipos en el mercado con características similares al prototipo que se está desarrollando. Esto permitirá generar gran impacto a partir de su puesta a punto y socialización
Amenazas: El proceso de compras ha retrasado la adquisición de los equipos necesarios para la fabricación y configuración del prototipo	Fortalezas: El grupo de trabajo se ha fortalecido en los temas fundamentales para el desarrollo del proyecto

Etapas o proyectos a desarrollar para darle continuidad a la línea de investigación: Construcción de prototipo - Pruebas de campo - Simulaciones computacionales - Validación de simulaciones
Estrategias de comunicación empleadas para difundir los resultados del proyecto: Artículo publicable - Memoria descriptiva

Explique los impactos que genera el proyecto de investigación: Desarrollo de un prototipo de un aerogenerador portátil para suministro de electricidad en zonas de desastres naturales.
--

Frente a la situación actual del proyecto, cual es el plan de acción propuesto: El cronograma está al orden del día en temas técnicos. Es necesario acelerar el proceso de compras para facilitar el desarrollo del prototipo
--

(Para el informe final debe anexarse un artículo, de carácter divulgativo, para la revista Universitas Científica)

Firma del Investigador/Docente Principal: _____

Firma del Coordinador de Grupo/Dir. Facultad: _____

Firma del Decano ó Director de Instituto: _____

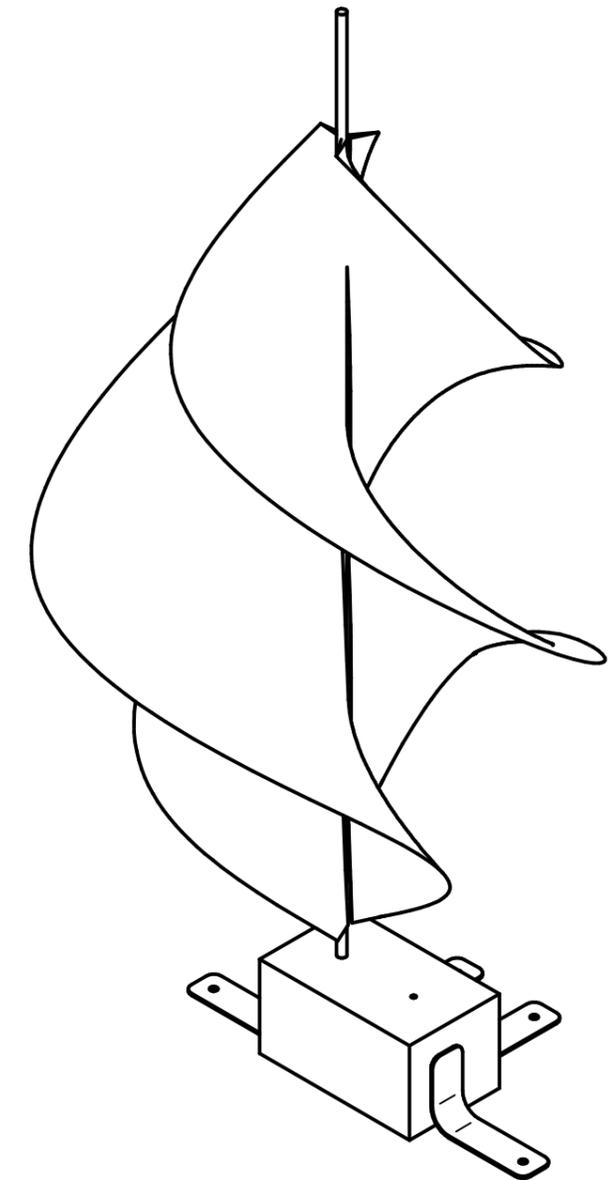
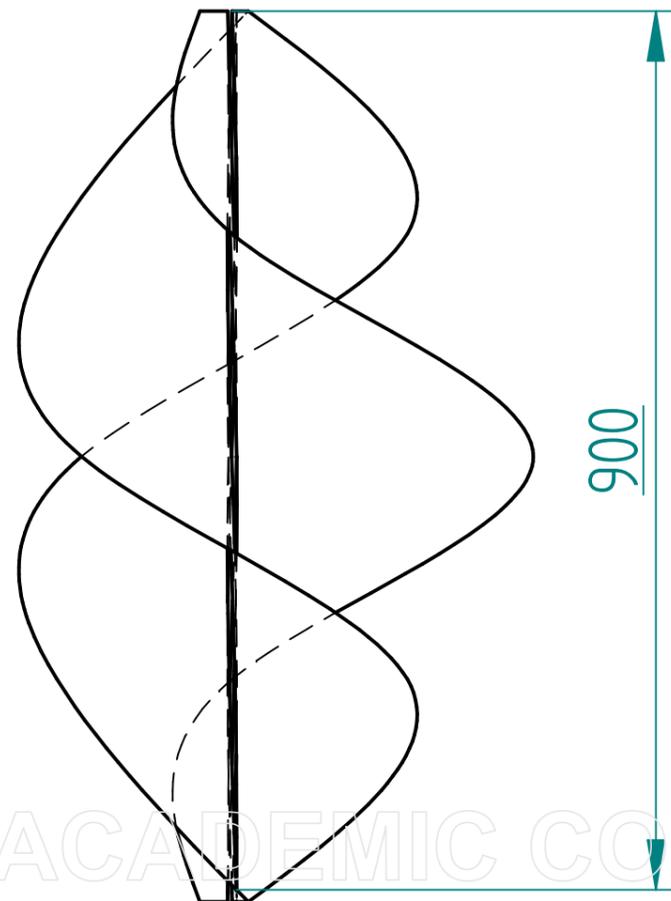
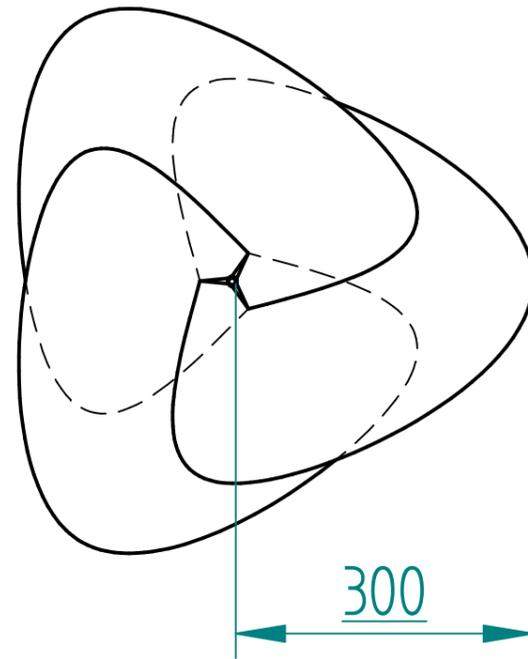
Fecha de recibido _____

<i>EVALUACIÓN</i>			
OBSERVACIONES	PLAN DE ACCIÓN	FECHA	SEGUIMIENTO

Firma del Director: _____

ANEXO E

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software		
Dibujado Sara	15/04/13			
Comprobado		Título		
Aprobado 1				
Aprobado 2		A3	Plano	Rev
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°		Archivo: aerogeneradorprot1.dft		
		Escala	Peso	Hoja 1 de 1