

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE



DISEÑO, FABRICACIÓN Y PRUEBAS DE UN
MICROAEROGENERADOR HÍBRIDO
MULTIPROPÓSITO

JONATHAN JAFHET MALDONADO JEREZ

MEMORÍA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MECÁNICO MENCIÓN ENERGÍA

PROFESOR GUIA: PROF. DR. ING. ALEX FLORES

PROFESOR CORREFERENTE: PROF. DR. ING. CHRISTOPHER NIKULIN

1 DE NOVIEMBRE DE 2020

Agradecimientos

Quisiera darle las gracias a mucha gente. Han sido tantas las personas que a lo largo de los años me ayudaron que seguro no podría nombrarlas.

Ellos saben quiénes son. Lo que no quiero hacer es dejar de saludar a mis Padres. Han sido un apoyo constante para mí todo este tiempo y sin ellos de verdad no hubiera podido conseguir lo que he logrado.

Gracias, Estelita y Hernán.

Resumen

El presente trabajo tiene por objetivo proponer un nuevo diseño para una turbina híbrida, es decir, que integre dos rotores ya conocidos para así aumentar su eficiencia. En este caso se optó por trabajar con rotores de eje vertical, trabajando en la integración de los rotores Savonius y Darrieus. Para estudiar el comportamiento aerodinámico de los rotores, se utilizó el software comercial ANSYS 17.1, en el cual viene implementado el método de volúmenes finitos. Para el modelamiento de la turbulencia se utilizó el modelo $k - \varepsilon$ realizable.

En primera instancia, se estudiaron los rotores a integrar por separado, trabajando en dos parámetros de sensibilidad; el número de alabes y el ángulo helicoidal, este último se define como el ángulo que describe el alabe con un plano horizontal. Para el rotor Savonius se trabajó con rotores de 2 a 4 alabes, variando su ángulo helicoidal de 40° a 90°. Mientras que para el rotor Darrieus se propusieron diseños de 2 y 3 alabes, y se varió su ángulo helicoidal entre 60° y 90°. Para hacer una correcta comparación entre los rotores analizados, se generó una curva característica para cada rotor, la cual consistía en la eficiencia aerodinámica en función de la velocidad específica.

Luego de las modelaciones, se obtuvo que el rotor Savonius con dos alabes y ángulo helicoidal de 60° fue el que obtuvo el mejor desempeño aerodinámico, mientras que para el rotor Darrieus fue el que estaba compuesto por dos alabes y ángulo helicoidal de 75°. Para su integración se generó una gráfica de la eficiencia en función del ángulo de rotación, con esto se integran ambos rotores evitando traslapes aerodinámicos. Al generar los prototipos de la turbina híbrida Darrieus Savonius, se implementó un nuevo parámetro de sensibilidad, este fue la distancia de separación entre ambos rotores.

El rotor fabricado tiene algunas diferencias respecto al utilizado en las modelaciones computacionales, se redimensionó respetando los parámetros de optimización obtenidos, se agregó un eje macizo para dar estabilidad, uniones entre rotores para concretar la mixtura de ambos rotores y copla en base del prototipo para fijar micromotor.

Finalmente, el rotor híbrido se fabricó realizando ensayos en un túnel de viento, se analizó su comportamiento y generación de potencia eléctrica obtenida. Se realiza una mejora continua de los prototipos al ensayar y descubrir ciertas carencias de diseño, obteniendo de esta forma un prototipo que logre mejores desempeños que los obtenidos con anterioridad.

Se obtuvo una curva de potencia eléctrica generada en función de la velocidad del viento, junto a consideraciones para futuros modelos de turbinas híbridas.

Palabras claves: Energía eólica, Aerogenerador, Rotor Savonius, Rotor Darrieus, Rotor Híbrido.

Abstract

The objective of this investigation is to propose a new design for a hybrid turbine, which is mean, to integrate two already known rotors in order to increase its efficiency. In this case, it is decided to work with vertical axis rotors, working on the integration of the Savonius and Darrieus rotors. To study the aerodynamic behavior of the rotors, was useful to know the commercial software ANSYS 17.1, where the finite volume method has been implemented. For the modeling of turbulence, the feasible $k - \varepsilon$ model was used.

First at all, the analyze of rotors were studied separately, working on two sensitivity parameters; the number of blades and the helical angle, the latter is defined as the angle that is described by the blade with a horizontal plane. For the Savonius rotor, we worked with 2- to 4-blade rotors, changing its helical angle from 40° to 90° . While for the Darrieus rotor, 2 and 3-blade designs were proposed, and its helical angle was varied between 60° and 90° . To make a correct comparison between the analyzed rotors, a characteristic curve was generated for each one, which consisted of aerodynamic efficiency as a function of the specific speed.

After modeling, it was found that the Savonius rotor with two blades and a 60° helical angle was the one to obtain the best aerodynamic performance, while the Darrieus rotor it was the one that was made up of two blades and a 75° helical angle. For this integration it was necessary to create a graph of efficiency in function of the angle of rotation, with this both rotors are integrated avoiding aerodynamic overlaps. To generate the prototypes of the Darrieus Savonius hybrid turbine, a new sensitivity parameter was implemented, this was the separation distance between both rotors.

The manufactured rotor has some differences in relation to the one used in computational modeling, it was resized respecting the optimization parameters obtained, a solid shaft was added to give stability, joints between rotors to specify the mixture of both rotors and coupling based on the prototype to fix micromotor.

Finally, the hybrid rotor was manufactured by performing tests in a wind tunnel, where was analyzed its behavior and the generation of electrical power. Continuous improvement of the prototypes is made by testing and discovering certain design deficiencies, thus obtaining a prototype that achieves better performances than those previously obtained.

An electrical power curve generated as a function of wind speed was obtained, together with considerations for future models of hybrid turbines.

Key words: Wind Power, Wind Turbine, Savonius Rotor, Darrieus Rotor, Hybrid Rotor.

Glosario

A : Área [m^2]

Q : Caudal [m^3/s]

γ : Coeficiente de dilatación adiabática [–]

C_m : Coeficiente de momento [–]

CP : Coeficiente de potencia [–]

R : Constante universal de los gases ideales [$J/kg \cdot K$]

ρ : Densidad [kg/m^3]

D : Diámetro del rotor [m]

η : Eficiencia [–]

ERNC: Energía renovable no convencional

a : Factor de inducción axial [–]

$\dot{m}$: Flujo másico [kg/s]

F : Fuerza [N]

M : Número de Mach [–]

P : Potencia [W]

PT : Potencia generada por la turbina [W]

p : Presión [Pa]

R : Radio [m]

RPM: Revoluciones por minuto [$1/min$]

T : Torque [$N \cdot m$]

HAWT: Turbina eólica de eje horizontal (en inglés)

VAWT: Turbina eólica de eje vertical (en inglés)

U : Velocidad [m/s]

Ω : Velocidad angular [rad/s]

c : Velocidad del sonido [m/s]

u : Velocidad en el eje x [m/s]

v : Velocidad en el eje y [m/s]

w : Velocidad en el eje z [m/s]

λ : Velocidad específica [–]

μ : Viscosidad dinámica [$kg/m \cdot s$]

Contenido

Resumen	2
Abstract.....	3
Glosario	4
1. Contexto	7
2. Planteamiento del problema.....	8
3. Análisis turbinas eólicas	9
3.1. Comparación cuantitativa	9
3.2. Curvas características	12
3.3. Modelo unidimensional ideal y límite de Betz.....	15
4. Estado del arte	18
4.1. Patentes	18
4.2. Turbinas elaboradas	25
4.3. Modelos comerciales.....	31
5. Propuesta de innovación tecnológica.....	35
6. Objetivos de la investigación	35
7. Metodología diseño constructivo	36
8. Impresión por deposición fundida (FDM) 3D	38
9. Diseño prototipo	42
9.1. Selección del perfil aerodinámico.....	43
9.2. Diseño rotor Darrieus	43
9.3. Diseño rotor Savonius	47
10. Análisis de simulaciones	48
10.1. Análisis rotor Savonius	48
10.2. Análisis rotor Darrieus	50
10.3. Configuración y diseño preliminar del prototipo.....	53
11. Selección del micromotor	56
11.1. Ensayo tensión en vacío micromotores	58
12. Realización del prototipo.....	60
12.1. Primer prototipo.....	61
12.2. Segundo prototipo.....	62
12.3. Tercer prototipo	63
12.4. Cuarto Prototipo.....	64
12.5. Quinto Prototipo	65
12.6. Sexto Prototipo.....	66
12.7. Errores de fabricación	67

13.	Ensayo en túnel de viento	69
13.1.	Equipos de Medición	70
13.2.	Análisis Ensayos Realizados	74
14.	Conclusiones	80
	Referencias.....	82

1. Contexto

La energía eólica proviene de las grandes masas de aire que se mueven a través del planeta, es decir, el viento, este movimiento de masas de aire se debe principalmente a la diferencia de presiones existentes a lo largo del planeta tierra, moviéndose de alta a baja presión. Los alabes de las turbinas de viento transforman esa energía cinética en energía mecánica, para esto se basan en la desviación del flujo de aire que posteriormente genera fuerzas de arrastre o sustentación (dependiendo la tecnología), y generan el torque necesario para girar el eje, en el cual se podrá aprovechar directamente la energía mecánica, o realizar una conversión mediante un generador a energía eléctrica dependiendo de la necesidad. La eficiencia de la conversión de la energía cinética a mecánica depende principalmente de la interacción que tiene el rotor con el flujo de aire.

El interés por aprovechar la energía cinética derivada del viento data del siglo VII, cuando en Afganistán se usaba para bombear agua o moler trigo en turbinas de eje vertical en las cuales se aprovechaba el arrastre generado por el viento. Durante la edad media la energía proveniente del viento tuvo las mismas aplicaciones, pero cambiando de un eje vertical a un eje horizontal. Las primeras apuestas para generar electricidad en base a la energía cinética del viento datan del siglo XIX.

Actualmente las turbinas modernas de viento se mueven por dos procedimientos; el primero llamado de arrastre, en que el viento empuja las aspas, y el segundo conocido como la sustentación, en el que las aspas se mueven de un modo parecido a las alas de un avión a través de una corriente de aire. Las turbinas de viento se pueden clasificar en dos tipos; las turbinas de ejes horizontales utilizadas para generar electricidad que tienen de una a tres aspas, en cambio las empleadas para bombeo pueden tener muchas más, y las turbinas de eje vertical, dentro de sus principales cualidades se destaca que pueden recibir el viento desde cualquier dirección, además de que el generador, como la caja amplificadora de velocidades pueden estar situadas al nivel del suelo, lo que hace que sea un método constructivo más económico y de fácil mantención.

Las turbinas eólicas trabajan con una fuente de potencia que fluctúa en el tiempo debido a las ráfagas, por lo que se debe diseñar cuidadosamente el sistema de control y la resistencia a la fatiga de los componentes. Por otra parte, se requiere de robustez y confiabilidad, esto implica especificaciones de diseños aerodinámicos muy particulares y da lugar al desarrollo de diversas tecnologías en las áreas de máquinas eléctricas, electrotecnia, electrónica y otras. El concepto más usado actualmente es del aparato tripala de eje horizontal alimentando una red trifásica. Es importante destacar que los países con industrias eólicas más importantes a nivel mundial son: Dinamarca, España, Alemania y Estados Unidos.

Durante las últimas dos décadas la potencia de las turbinas eólicas aumentó hasta superar los 3 Mega Watts. Además, se han probado diferentes conceptos logrando avances tecnológicos importantes, ayudando al desarrollo de turbinas de mayor rendimiento, tanto de alta como de baja potencia.

2. Planteamiento del problema

El problema que se busca resolver aborda el diseño y construcción de una turbina que se adapte a diversos usos, es decir, una máquina que genere buenos niveles de potencia mecánica y eléctrica en un mismo diseño. La turbina debe ser capaz de partir por sí sola, esto quiere decir que deberá ser liviana para superar su inercia inicial, además de ser resistente ya que se someterá a grandes velocidades de rotación, debiendo soportar las vibraciones de los elementos rotativos, también deberá soportar grandes flujos de aire en sus alabes a diferentes rangos de velocidades. La vida útil de los materiales es otro factor para considerar, es importante mencionar que la turbina podrá operar tanto vertical como horizontalmente, con lo cual podrá ser catalogada como una turbina híbrida, reuniendo las ventajas de las turbinas verticales y horizontales.

En base a la investigación “Diseño, fabricación y prueba de un micro aerogenerador híbrido multipropósito” de Ricardo Sanzana [1], Sept. 2017, realizada en el Departamento de Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María, sobre turbinas eólicas híbridas, se plantea la posibilidad de combinar una turbina Darrieus con una Savonius en su parte interior. De esta manera se utilizan fuerzas de sustentación (Darrieus) que ayudan a la partida inicial en combinación con fuerzas de arrastre (Savonius) que brindan una fuente de torque suficiente al eje, pudiendo ser utilizada para multipropósitos diferentes a la generación de electricidad. La turbina está compuesta por alabes helicoidales que generan un mejor desempeño aerodinámico, al maximizar el área en que se encuentran expuestos al flujo de aire. La tecnología implementada logra el torque necesario para que la turbina se adapte a diversos usos, es decir que pueda abarcar desde un bombeo de agua, hasta la generación de electricidad.

Si bien existen distintas tecnologías en cuanto a turbinas eólicas, sus ventajas son totalmente contradictorias en ocasiones, por ejemplo, las turbinas de eje horizontal deben orientarse para recibir el viento, mientras que las turbinas de eje vertical pueden recibir el viento desde cualquier dirección. Por otra parte, las turbinas de eje horizontal, al ser accionadas mediante fuerzas de sustentación, su nivel de torque es muy bajo con respecto a una turbina de eje vertical, por lo tanto, sus usos difieren en gran medida. Es por esto, que se plantea solucionar en parte estas diferencias entre tecnologías considerando también que la eficiencia no se puede ver perjudicada en gran medida.

También se debe llevar a cabo un análisis delicado al seleccionar el equipo o sistema que realizara la conversión de energía mecánica a energía eléctrica, de manera de optimizar el rendimiento. Finalmente se hará énfasis en las diferentes problemáticas que se pueden presentar durante la fabricación del modelo, eje que brinde estabilidad al rotor, fijaciones o estabilizadores que faciliten la partida y sean capaces de aliviar los esfuerzos de elementos mecánicos. El diseño propuesto en la modelación computacional realizada por Ricardo Sanzana se vio sometido a algunos cambios en su fabricación, ya que la extrusión de material se ve limitada por la geometría de este.

3. Análisis turbinas eólicas

Existen diversas variables que se deben considerar al realizar un análisis cuantitativo entre turbinas eólicas, se puede analizar el torque generado como también la potencia que es capaz de producir una turbina. Se describe a continuación la forma de obtener diferentes parámetros adimensionales que permitan comparar la eficiencia esperada con la eficiencia de cada ensayo de los prototipos estudiados.

Se analizarán las curvas características en función del número de alabes e inclinación de estos, relacionando la eficiencia de la turbina para transformar energía y la velocidad específica de cada turbina.

3.1. Comparación cuantitativa

Para una correcta comparación cuantitativa entre distintos tipos de turbinas, se debe realizar un análisis tanto de potencia como torque que cada una puede entregar, esto con el fin de tener parámetros adimensionales que puedan comparar las distintas eficiencias independientes de su configuración.

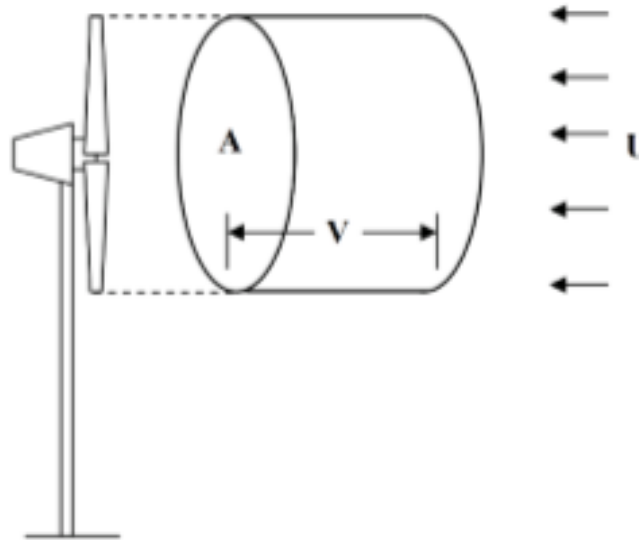


FIGURA 3.3.1 PARÁMETROS DEL FLUIDO EN UNA TURBINA EÓLICA.

Para esto se define la energía teórica disponible a través de un flujo de viento:

$$P = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (3.1)$$

Donde ρ corresponde a la densidad del aire en el volumen de control, A al área proyectada por las aspas de los rotores y U a la velocidad del flujo de viento. Posteriormente, se define un coeficiente de potencia (C_p), el cual básicamente es la eficiencia con la cual la turbina transforma la energía, por lo tanto, es la razón entre la potencia real entregada por la turbina (P_T) y la potencia disponible en el viento.

$$C_P = \frac{P_T}{\frac{1}{2}\rho AU^3} \quad (3.2)$$

Como se dijo anteriormente, la potencia entregada por la turbina va a depender de una serie de factores, como la disposición de las aspas, el número de aspas, etc. La fuerza de empuje que experimenta el rotor se puede expresar como:

$$F = \frac{1}{2}\rho AU^2 \quad (3.3)$$

Bajo esta premisa, el torque se deduce como:

$$T = \frac{1}{2}\rho AU^2 R \quad (3.4)$$

Donde R corresponde al radio del rotor. Por lo tanto, de manera análoga al coeficiente de potencia, existe un coeficiente de torque, el cual relaciona el torque real (T_T) entregado por la turbina, con el torque disponible:

$$C_T = \frac{T_T}{\frac{1}{2}\rho AU^2 R} \quad (3.5)$$

Como se vio en la potencia disponible en el viento, esta expresión dependía de la velocidad del viento al cubo, por lo tanto es una variable a considerar, pero también en el cálculo del coeficiente de potencia se pueden producir ciertas incongruencias, como por ejemplo, si el rotor está girando a una velocidad muy baja, y por otro lado el viento tiene una gran velocidad, una porción del viento podría pasar a través de las aspas sin interactuar con estas, por lo tanto se estaría asumiendo que todo el flujo podría ser aprovechado, lo que resultaría en un error en el cálculo del coeficiente de potencia. En el caso contrario, si el rotor gira a gran velocidad, mientras que el viento no posee una gran velocidad, la corriente de viento podría verse desviada dada la turbulencia generada por el rotor, en consecuencia, en este caso también se tendría un error de cálculo. Por lo que también es necesario definir una relación entre la velocidad del viento y la velocidad en el extremo de las aspas, llamada velocidad específica (λ).

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V} = \frac{2\pi NR}{V} \quad (3.6)$$

Donde N corresponde a la velocidad rotacional del rotor y Ω la velocidad angular. Como cada máquina, las turbinas también tienen una eficiencia máxima de operación, en este caso se debe considerar que el coeficiente de potencia y torque también varían con respecto a la velocidad específica, por lo tanto, para encontrar la relación entre estas variables se debe tener en cuenta que $P = \Omega T$, con esto la ecuación (3.2) se podría reescribir como:

$$C_P = \frac{\Omega T_T}{\frac{1}{2}\rho AU^3} \quad (3.7)$$

Usando la nueva expresión encontrada para el coeficiente de potencia, se divide la ecuación (3.7) por (3.5), obteniendo:

$$\frac{C_P}{C_T} = \frac{\Omega R}{V} = \lambda \quad (3.8)$$

Ya definidas las variables adimensionales, con las cuales son posibles caracterizar los distintos tipos de turbinas, se observa en el Gráfico 3.1 que el rendimiento de las turbinas sube a medida que aumenta la velocidad específica hasta llegar a un óptimo de operación, para posteriormente reducir su eficiencia a medida que aumenta la velocidad específica. Si se analiza la turbina multi-aspas, se observa que presenta un bajo coeficiente de potencia y velocidad específica, donde según la ecuación (3.8) existe una predominancia en el coeficiente de torque, lo que la hace más atractiva a la hora de decidir por una turbina para el bombeo de agua. Por otro lado, el bajo coeficiente de potencia se explica por las grandes pérdidas que se generarían al usar el arrastre como la fuerza impulsora para girar el eje. En el otro extremo, se encuentran las turbinas del tipo Darrieus y horizontal de tres aspas, las cuales cuentan con una gran eficiencia, por lo tanto, su aplicación se da en generación de energía eléctrica. La turbina del tipo Savonius trabaja con una velocidad específica relativamente baja, llegando a alcanzar eficiencias de hasta 30 % lo cual no deja de ser importante considerando sus bajos costos de construcción.

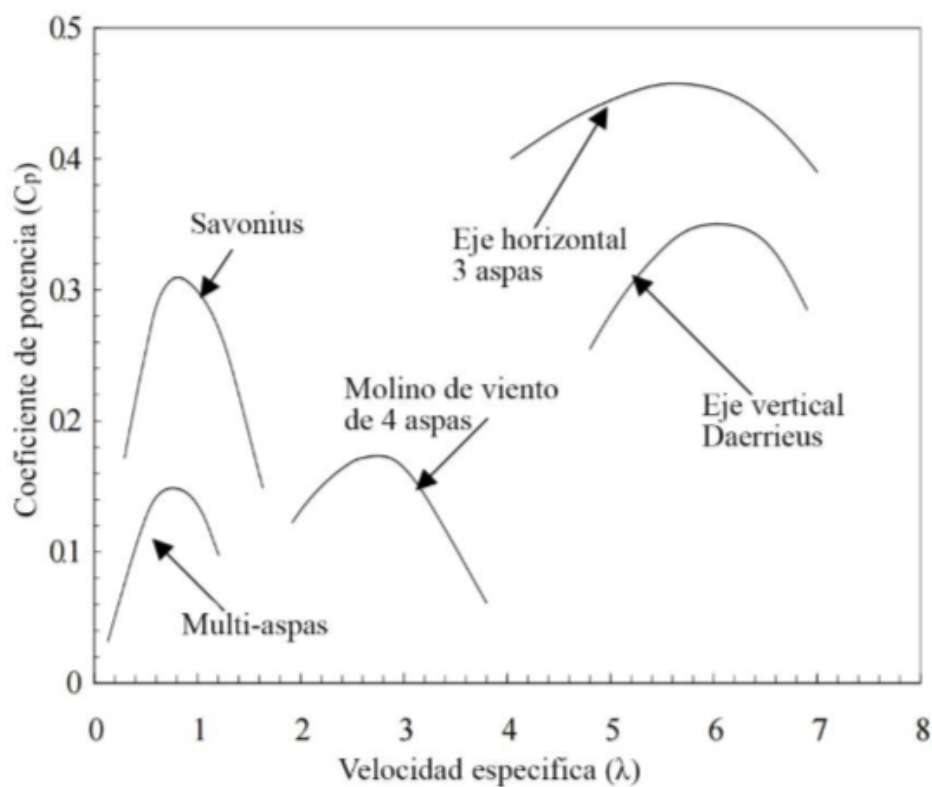


GRÁFICO 3.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS PARA DIFERENTES TIPOS DE TURBINAS EÓLICAS.

3.2. Curvas características

Cuando se habla del rendimiento de una turbina eólica generalmente se usan tres indicadores; potencia, torque y empuje, cada parámetro variará con respecto a la velocidad del viento incidente en el aerogenerador. La potencia va a determinar la cantidad de energía capturada por el rotor, el torque indicará el uso que se le podría dar a la turbina y también el tamaño de la caja amplificadora, por otro lado, el empuje tendrá gran influencia en el diseño estructural que soporte la turbina.

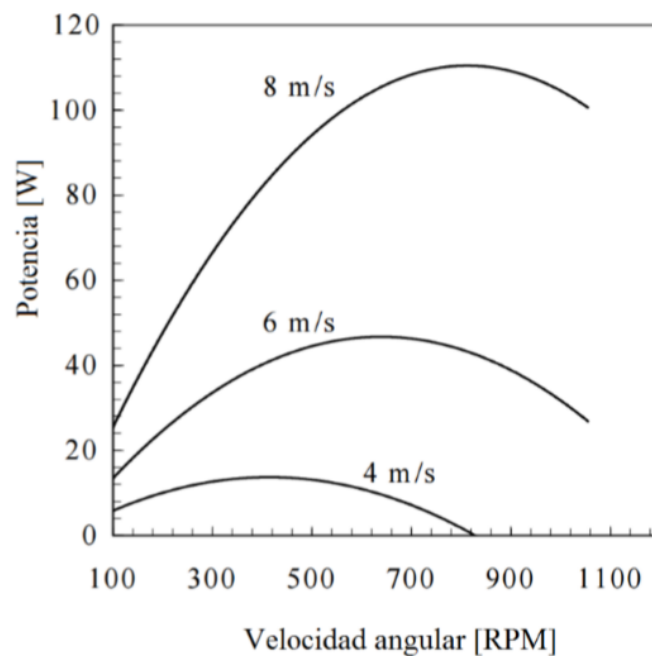


GRÁFICO 3.2 ENTREGA DE POTENCIA EN RELACIÓN CON DISTINTAS VELOCIDADES DE VIENTO.

Si se efectúa un ensayo a un aerogenerador cualquiera, manteniendo la velocidad del flujo de aire constante y variando la velocidad angular del rotor, se podría obtener una curva similar a la mostrada en el Gráfico 3.2. Como se observa, la potencia de salida irá aumentando hasta obtener el óptimo para cada velocidad, para después decrecer debido a una disminución de la interacción del flujo de aire con el rotor. Tomando en consideración la relación establecida en la ecuación (3.2) y (3.6), se podría expresar una curva única para cada turbina, independiente de la velocidad con la que se hayan hechos las pruebas de la turbina, ya que cada medición debería converger a una única curva característica. Esto se explica porque la energía disponible en el aire tiene una relación directa con la velocidad del viento, por lo tanto, si se variara la velocidad del aire manteniendo la velocidad angular, la eficiencia de la turbina no debiese tener una mayor variación, dado que, si bien la potencia de salida de la turbina es mayor, esto se debe netamente a que existe una mayor cantidad de energía disponible, manteniendo así la eficiencia constante para esa velocidad específica (λ).

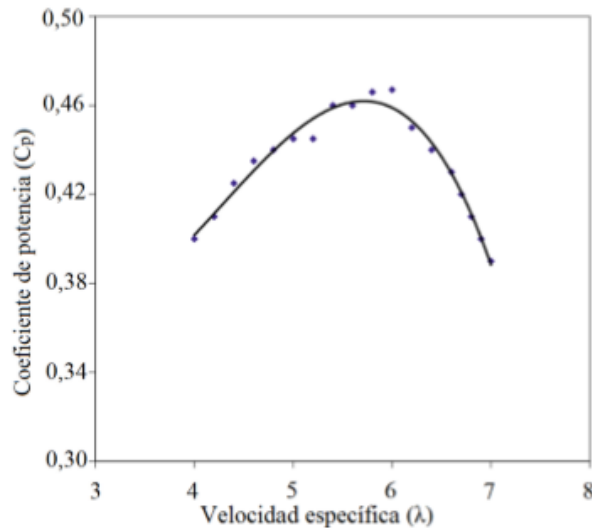


GRÁFICO 3.3 CURVA CARACTERÍSTICA PARA UNA TURBINA DE EJE HORIZONTAL.

La curva $C_p - \lambda$ es frecuentemente utilizada para caracterizar una turbina eólica, ya que da un amplio panorama de la eficiencia del aerogenerador. Su forma se explica a que a bajas velocidades características (incluso 0 dependiendo del tipo de turbina), el rotor no gira por lo tanto no se extrae energía del viento, en consecuencia, hay una eficiencia nula. Con altas velocidades específicas el rotor se encuentra girando a altas velocidades, por lo tanto, para el viento el rotor es un disco “sólido”, esto significa que no hay transporte de masa a través del rotor y con ello una eficiencia baja o nula. Para velocidades específicas entre 4 y 7, como el caso del Gráfico 3.3 (variará dependiendo del tipo de rotor), se alcanza la eficiencia óptima asociado a una velocidad específica. Identificar esta velocidad específica toma real importancia cuando se trabaja con sistemas de transmisión entre el rotor y el generador, dado que se deben programar los mecanismos de control para siempre buscar esa velocidad específica. En el Gráfico 3.4, se observa cómo sería la proyección de la velocidad específica óptima para un rotor cualquiera, esta curva variará de forma cúbica.

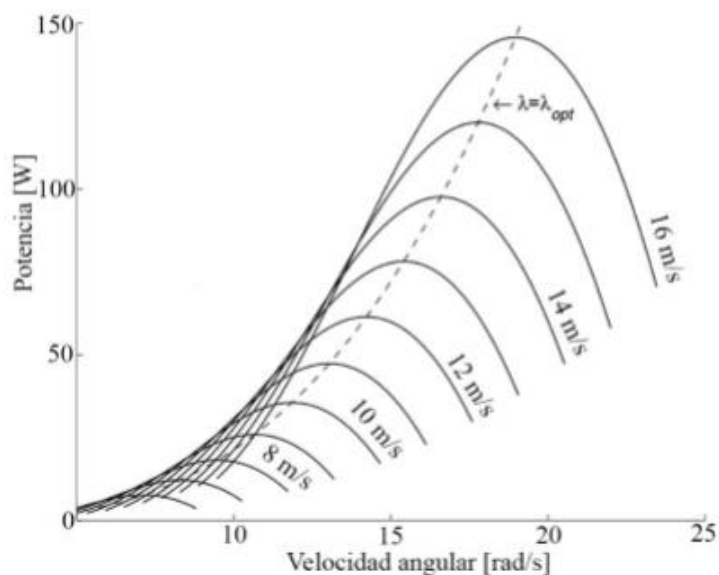


GRÁFICO 3.4 PROYECCIÓN DE LA VELOCIDAD ESPECÍFICA ÓPTIMA.

Dado que el flujo de viento puede aumentar de forma peligrosa, siendo esto perjudicial para los componentes de la turbina, se deben establecer una serie de mecanismos de control para la protección de estos. Es por esto por lo que se define una velocidad de corte, V_0 en el Gráfico 3.5. Otra velocidad característica de una turbina es la conocida como cut-in (V_i), la cual se define como la velocidad mínima en la que el sistema comienza a producir potencia de salida, la cual no debe confundirse con la velocidad de puesta en marcha, la cual indica la velocidad mínima en la que el rotor comienza a girar. Por razones técnicas y económicas las turbinas deben tener una potencia de salida constante, la cual es alcanzada con la velocidad nominal (V_R), generalmente es a esta velocidad donde la eficiencia de la turbina es máxima.

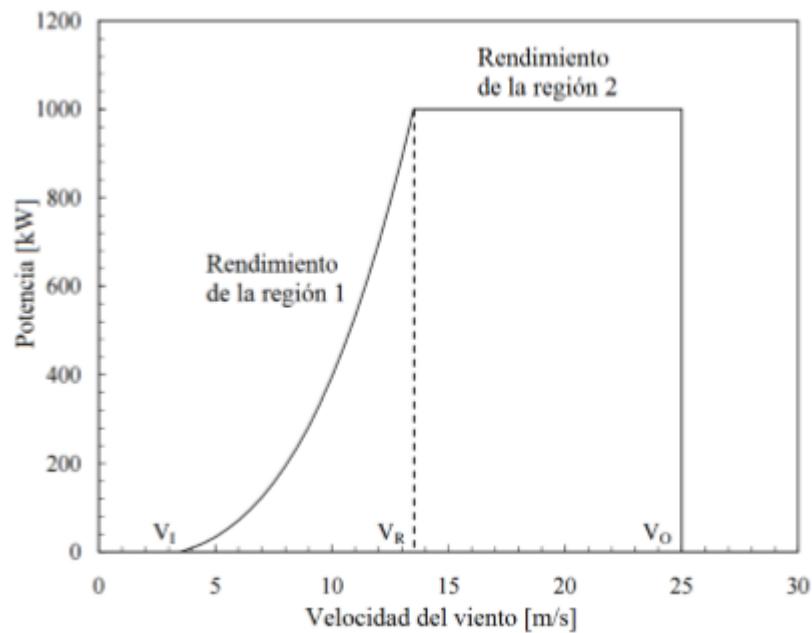


GRÁFICO 3.5 ENTREGA DE POTENCIA DE UNA TURBINA CON MECANISMOS DE CONTROL.

3.3. Modelo unidimensional ideal y límite de Betz

El modelo unidimensional es el más simple de todos, y fue desarrollado por el físico alemán Albert Betz en 1926. En el análisis se asume un volumen de control en el cual los bordes encierran el flujo de aire, teniendo una entrada en 1 y salida en 4 (Ver Figura 3.2). El modelo considera los siguientes supuestos:

- Fluido homogéneo e incompresible
- Estado estacionario • Sin pérdidas de arrastre
- Número infinito de alabes del rotor
- Empuje uniforme a lo largo del área del rotor
- Sin rotación del fluido luego del paso por rotor
- La presión estática muy alejada aguas arriba y abajo es igual a la presión ambiental

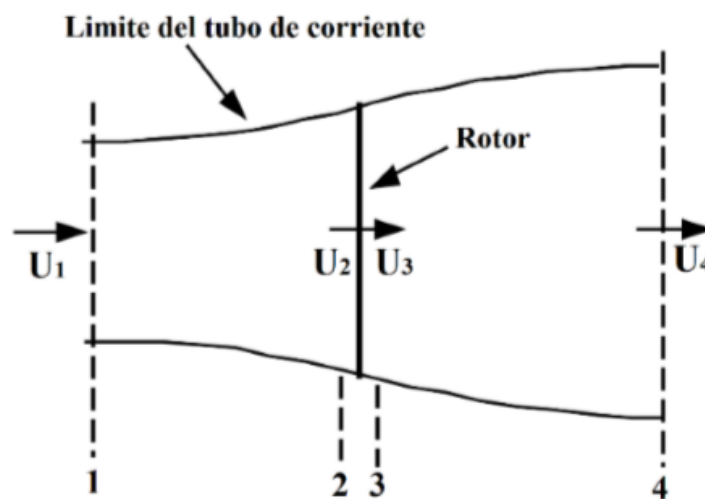


FIGURA 3.2 ESQUEMA DE REPRESENTACIÓN DEL MODELO DE MOMENTUM UNIDIMENSIONAL.

En primer lugar, se definen las cuatro velocidades definidas en la Figura 3.2, teniendo a U_1 la velocidad del flujo libre, U_2 la velocidad antes del rotor, U_3 la velocidad inmediatamente posterior al rotor y U_4 la velocidad estabilizada de la estela. En el volumen de control, entre 1 y 2 se define como aguas arriba, y entre 3 y 4 se denominará aguas abajo.

Siguiendo con el análisis, se debe aplicar la conservación del momentum lineal en el volumen de control, donde la fuerza resultante será igual y opuesta al empuje, la cual es la fuerza que ejerce el viento sobre el aerogenerador.

$$F = \dot{m}(U_1 - U_4) \quad (3.9)$$

Donde $\dot{m}$ corresponde al flujo másico, y al ser un flujo en estado estacionario se puede considerar la relación $\dot{m} = (\rho AU)_1 = (\rho AU)_4$, por otro lado, ρ corresponde a la densidad del aire y A el área transversal.

Si se analiza lo que sucede aguas arriba y abajo, se observa que no existe un trabajo en estas áreas, por lo tanto, la ecuación de Bernoulli se puede considerar el volumen de control entre 1 y 2, y también entre 3 y 4. Por lo tanto para aguas arriba se obtendría:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2 \quad (3.10)$$

Mientras que para el volumen de control aguas abajo:

$$p_3 + \frac{1}{2}\rho U_3^2 = p_4 + \frac{1}{2}\rho U_4^2 \quad (3.11)$$

Si se toman los puntos 1 y 4 como distancias muy alejadas del rotor, se puede considerar que la presión en estos puntos equivale a la presión ambiental, por lo tanto, $p_1 = p_4$. Otra de las consideraciones que se realiza en el análisis, es que la velocidad luego de pasar por el rotor no sufre modificación, esto equivale a decir que $U_2 = U_3$. Bajo esta premisa, y si se despejan los términos de presión en los puntos 1 y 4, se obtiene:

$$p_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2 - \frac{1}{2}\rho U_1^2 \quad (3.12)$$

$$p_4 = p_3 + \frac{1}{2}\rho U_3^2 - \frac{1}{2}\rho U_4^2 \quad (3.13)$$

Igualando las ecuaciones (3.12) y (3.13) por los supuestos ya descritos, se obtiene la siguiente relación:

$$p_2 - p_3 = \frac{1}{2}\rho(U_1^2 - U_4^2) \quad (3.14)$$

Por otro lado, la fuerza ejercida sobre el rotor se puede expresar como una diferencia de presión entre la sección 2 y 3, quedando:

$$F = A_2(p_2 - p_3) \quad (3.15)$$

Sustituyendo la ecuación (3.14) en (3.15), se expresa la siguiente relación:

$$F = \frac{1}{2}\rho A_2(U_1^2 - U_4^2) \quad (3.16)$$

Por lo tanto, igualando la ecuación (3.9) con (3.16) y reconociendo el flujo másico de la ecuación (3.16) como $\dot{m} = \rho A_2 U_2$, se establece:

$$U_2 = \frac{U_1 + U_4}{2} \quad (3.17)$$

Observando la ecuación (3.17), y bajos los supuestos presentados, se puede decir que la velocidad del flujo en la sección del rotor es el promedio entre las velocidades de aguas arriba y abajo.

Para un mayor análisis, también se pueden incorporar indicadores del comportamiento del flujo, como el factor de inducción axial. Este se define como la fracción de disminución de la velocidad del flujo libre luego de pasar por el rotor, matemáticamente se puede expresar como:

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (3.18)$$

Desarrollando algebraicamente las ecuaciones (3.9) y (3.10) se obtiene:

$$U_2 = U_1(1 - a) \quad (3.19)$$

$$U_4 = U_1(1 - 2a) \quad (3.20)$$

Donde el término $U_1 a$ se puede describir como la velocidad inducida en el rotor, por lo tanto, la velocidad en el rotor corresponde a una combinación entre la velocidad del flujo libre y la velocidad inducida. A medida que el factor de inducción axial (a) aumenta desde 0, la velocidad detrás del rotor se ralentiza cada vez más, pero lógicamente éste tiene un límite, el cual es impuesto por la ecuación (3.20), teniendo como máximo cuando $a = 1/2$, con lo cual la teoría sería físicamente imposible.

Al tener la fuerza resultante actuando sobre el rotor, y conociendo que la potencia es igual a la multiplicación de la fuerza por la velocidad, se podría obtener la potencia ejercida por el rotor multiplicando la velocidad en el rotor (U_2) por la ecuación (3.16), obteniendo:

$$P = \frac{1}{2} \rho A_2 (U_1^2 - U_4^2) U_2 = \frac{1}{2} \rho A_2 U_2 (U_1 - U_4)(U_1 + U_4) \quad (3.21)$$

Con lo cual si se reemplaza los términos U_2 y U_4 de las ecuaciones (3.19) y (3.20), se determina la siguiente relación:

$$P = \frac{1}{2} \rho A_2 U^3 4a(1 - a)^2 \quad (3.22)$$

El rendimiento de una turbina se puede expresar como un factor adimensional, en este caso al tener la potencia de la turbina se tendría:

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A_2 U^3} = 4a(1 - a)^2 \quad (3.23)$$

Por lo tanto, para conocer la máxima eficiencia que alcanzaría una turbina eólica solo bastaría con conocer la solución de:

$$\frac{dC_P}{da} = 0 \quad (3.24)$$

Resolviendo la ecuación (3.24) se obtiene como solución $a = 1/3$, por lo tanto, reemplazando en la ecuación (3.23), la máxima eficiencia que alcanzaría un aerogenerador en un escenario ideal es de 59,26%, lo que es conocido como el límite de Betz.

4. Estado del arte

En la actualidad existen diversas patentes de aerogeneradores de baja potencia, Por lo que se realizó una búsqueda exhaustiva de patentes relacionadas con la problemática, así como revisión de diversos libros, artículos y fichas técnicas de aerogeneradores comerciales. A continuación, se detallan las patentes que logran solucionar de mejor manera la problemática o presentan un interés en particular.

4.1. Patentes

En primer lugar, se consultó la patente “Hybrid type vertical shaft turbine for wind power generating devices” [2], en donde los autores tomaron dos tecnologías presentes dentro de las turbinas verticales, y las montaban dentro del mismo eje. Por lo tanto, como se aprecia en la Figura 4.1, en cuyo exterior tiene un rotor del tipo Darrieus y por el interior un rotor Savonius. Según lo planteado por los autores, con esta propuesta se solucionan los problemas de la falta de una auto partida para la turbina de eje vertical, aumentando también el torque generado por la turbina, al contar con su principio de funcionamiento usando el arrastre (Savonius) y complementándolo con una fuerza de sustentación (Darrieus). También es importante mencionar que los autores aseguran que el coeficiente de potencia por separado es de 19% para la turbina Savonius y de 25% para la turbina Darrieus, mientras que la turbina híbrida propuesta podría presentar un coeficiente de potencia de hasta 37%.

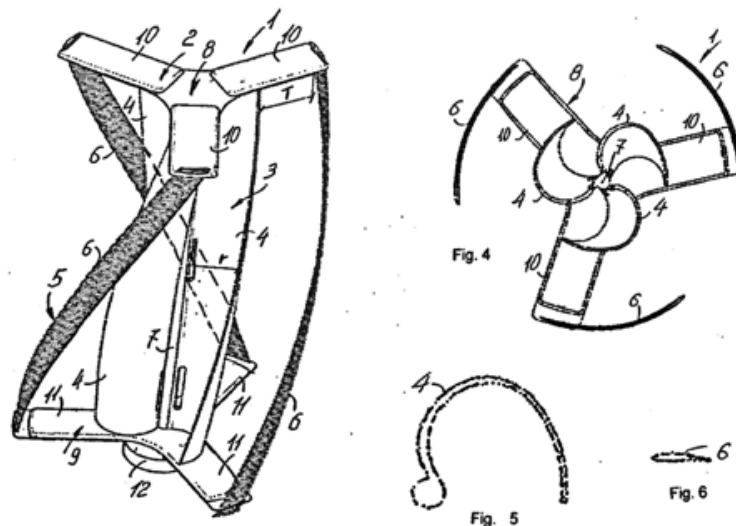


FIGURA 4.1 VISTA ISOMÉTRICA Y SUPERIOR DE LA TURBINA PROPUESTA EN LA PATENTE “HYBRID TYPE VERTICAL SHAFT TURBINE FOR WIND POWER GENERATING DEVICES”.

La segunda patente que intenta resolver la problemática planteada es propuesta por V. Kane [3]. En ella se detalla una estructura donde en primera instancia se asemeja a una turbina de eje, presentando en su parte inferior el generador y también teniendo en su base un volante de inercia para manejar de mejor manera las fluctuaciones del viento. V. Kane propone un rotor

compuesto por alabes en forma de S, donde su número puede variar entre 5 y 15, y estos a su vez están adosados a un anillo que se encuentra fijo en el eje.

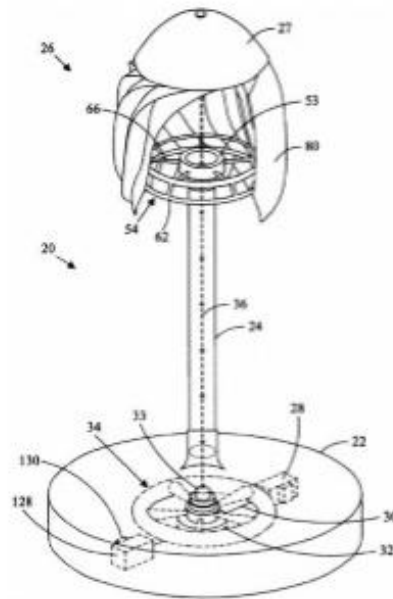


FIGURA 4.2 TURBINA PROPUESTA POR VIC KANE “KANE V., KANE V., «WIND TURBINE»”.

Si bien el rotor se presenta en forma vertical, también puede ser usado de forma horizontal dada su forma. Esto se puede observar en la Figura 4.3, donde el autor define que el rotor se puede montar sobre una estructura que lo soporte y que sea capaz de girar en la dirección del viento, a pesar de que Kane afirma que el rotor es capaz de recibir el viento de forma perpendicular o paralela al eje que sostiene el rotor. Por lo tanto, este diseño soluciona una de las dificultades presentes en las turbinas de eje horizontal, donde los mecanismos para buscar la mejor orientación con el viento en ocasiones resultan de difícil fabricación y costo.

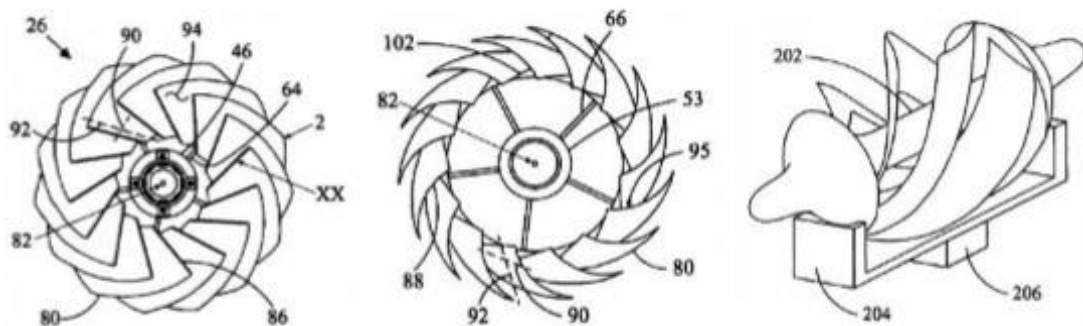


FIGURA 4.3 DETALLE DEL ROTOR PROPUESTO POR VIC KANE “WIND TURBINE”.

La tercera patente fue propuesta por Warner, Figura 4.4 [4], donde el diseño es similar al propuesto por Vic Kane, Warner resalta entre sus características que en primer lugar el viento puede provenir desde cualquier dirección, por otro lado, soluciona el problema de las turbinas verticales al proponer que la turbina puede comenzar su rotación por sí sola. También el autor menciona que el rotor puede operar con un amplio rango de velocidades del viento, donde su principal virtud es girar a bajas velocidades, por otro lado, en altas velocidades Warner explicita que no se requiere de un freno, dada la aerodinámica del rotor este tiene una velocidad límite

independiente del viento que le esté llegando a esta, esto debido a que según Warner los alabes son flexibles, por tanto alcanzando la velocidad límite, estos son capaces de doblarse de forma natural para protegerse del viento. Con respecto al montaje, a diferencia de lo propuesto por Vic Kane, donde se daba la opción de un montaje horizontal o vertical, Warner adicionalmente menciona que el montaje se puede realizar en un ángulo intermedio y seguir extrayendo energía desde el viento.

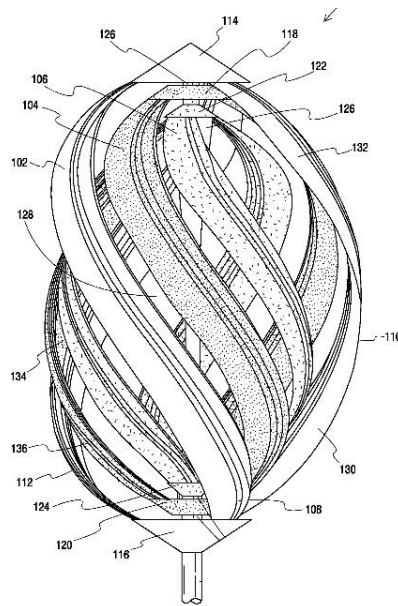


FIGURA 4.4 ROTOR PROPUESTO POR WARNER “NOVEL TURBINE AND BLADES”.

Otra de las diferencias en comparación con lo propuesto por Vic Kane, es que los alabes curvados en forma de S están dispuestos en tres anillos concéntricos y conectados al mismo eje, donde el autor además señala que cada anillo puede girar en forma independiente. Warner justifica esta adición de anillos para incrementar la eficiencia con la cual se extrae energía desde el viento, mencionando que según pruebas realizadas la adición de cada anillo iba incrementando su eficiencia hasta llegar a los tres anillos. Con esta propuesta, se resuelven varias de las problemáticas planteadas, como el proponer un diseño de turbina que mezcle una turbina vertical como horizontal, pero de manera preliminar aún no se cuenta con una fuente de torque suficiente para usos diferentes a la generación de electricidad.

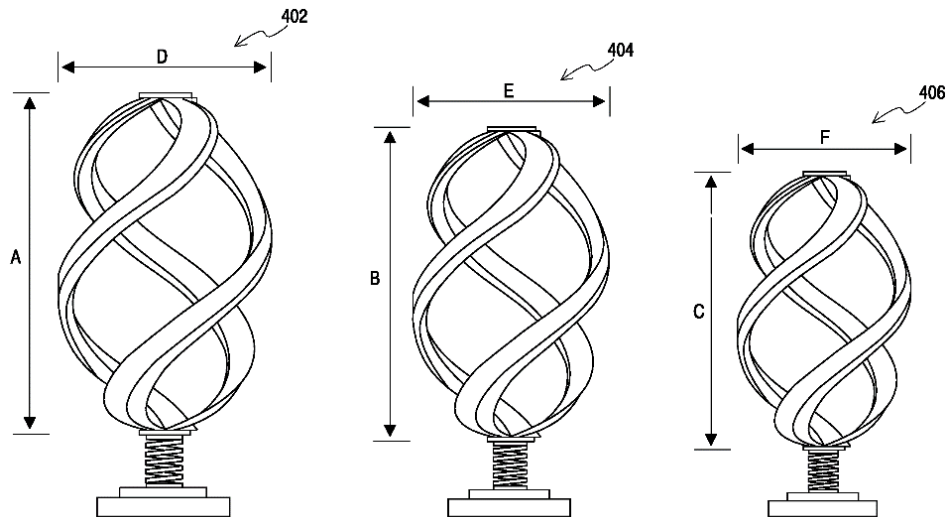


FIGURA 4.5 DETALLE DEL ROTOR PROPUESTO POR WARNER “NOVEL TURBINE AND BLADES”.

Siguiendo con la misma línea, otra propuesta similar es la de Becker [5], donde se observa en la Figura 4.6, que la turbina está compuesta por tres anillos, los cuales le dan robustez a la estructura. En ellos están instalados los alabes con una forma muy similar a las propuestas por Vic Kane y Warner. El autor también plantea que la turbina es capaz de soportar altas velocidades de viento, y así también ser operada a bajas velocidades, de esta manera su rango de velocidades es muy amplio. Becker también afirma que la forma helicoidal de los alabes maximiza el área en la cual estos están expuestos al flujo de aire.

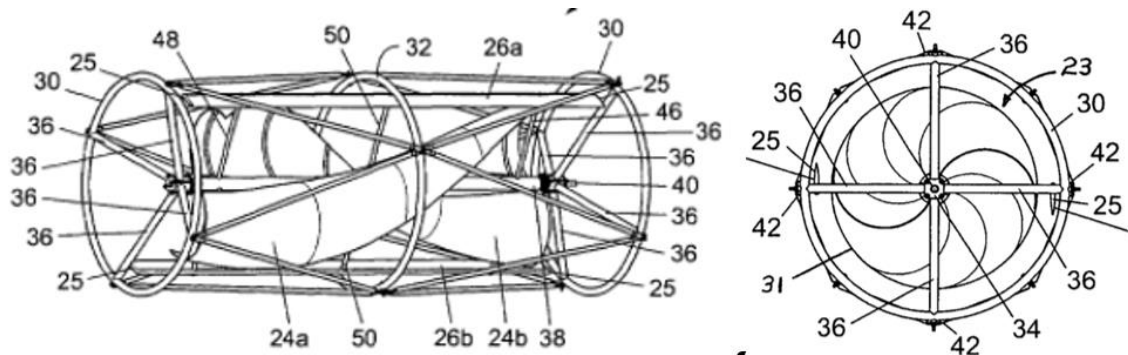


FIGURA 4.6 VISTA ISOMÉTRICA Y FRONTAL DEL ROTOR DE BECKER “WIND TURBINE DEVICE”.

Al igual que Warner, Becker expone que la turbina puede ir montada en diferentes posiciones según se estime conveniente, esto quiere decir, que puede montarse de manera horizontal, vertical o un ángulo intermedio a determinar, esto depende también según el uso que se dé. Aludiendo a la forma de la estructura, el autor se refiere a que esta puede ser de la forma que se estime conveniente, dando como ejemplos estructuras cilíndricas, cónicas u otra forma. Por otro lado, la transmisión puede ser bajo una correa o por medio de transmisión directa al eje de generador o la aplicación que se estime.

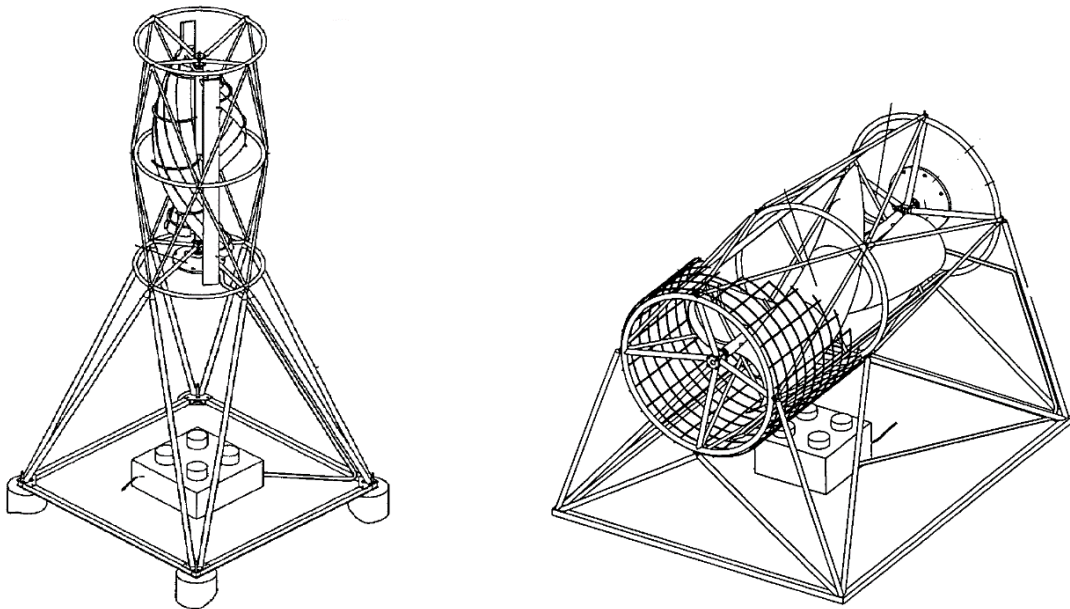


FIGURA 4.7 DIFERENTES DISPOSICIONES DE LA TURBINA DE BECKER “WIND TURBINE DEVICE”.

Una particularidad de esta invención es que el autor también considera que se pueden usar en aplicaciones de almacenamiento de aire comprimido, como se muestra la Figura 4.8, con lo cual se resuelve uno de los problemas planteados, es decir, darle un uso multipropósito a la turbina propuesta.

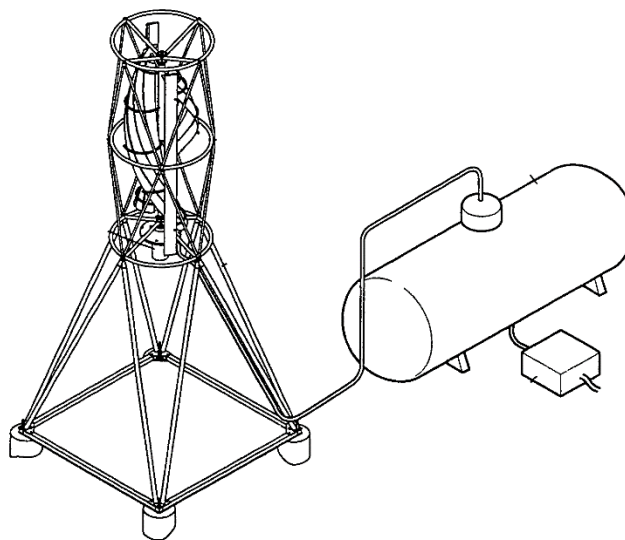


FIGURA 4.8 APLICACIÓN DE LA TURBINA PROPUESTA POR BECKER “WIND TURBINE DEVICE”.

La siguiente patente que se investigó, es propuesta por Roberts [6]. En ella se detalla una estructura donde en la parte exterior se ubican alabes orientables, esto con el fin de orientar el flujo de viento para evitar los puntos aerodinámicos muertos, y en la parte interior una turbina del estilo Savonius separada en pisos y con diferentes orientaciones para asegurar la captación del viento, lo cual asegura una buena cantidad de torque al trabajar con el arrastre del flujo de aire como principio de funcionamiento.

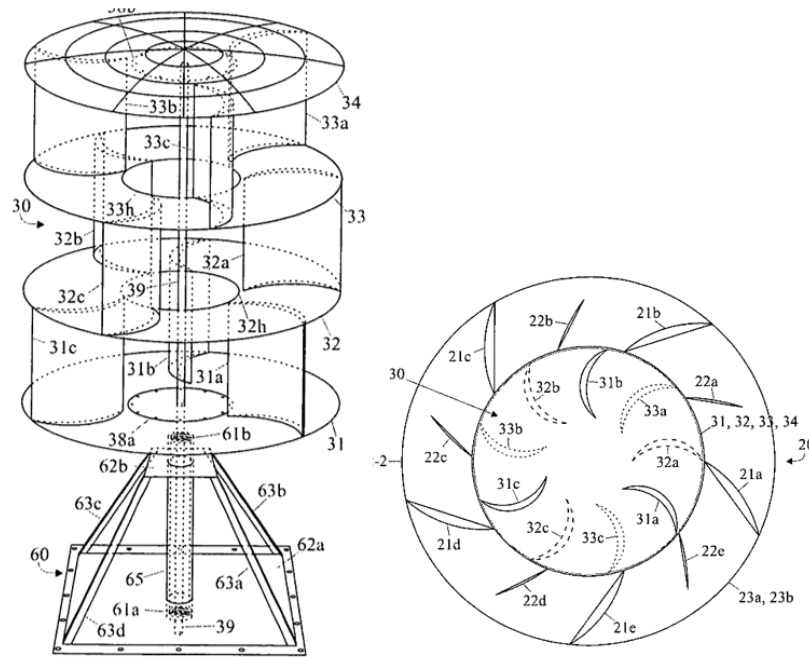


FIGURA 4.9 VISTA ISOMÉTRICA Y EN CORTE DEL ROTOR PROPUESTO POR ROBERTS “AERODYNAMIC-HYBRID VERTICAL-AXIS WIND TURBINE”.

La turbina puede verse compleja por los alabes que orientan el flujo, ya que estos tienen un diseño poco aerodinámico generando vórtices al aumentar la velocidad del flujo, las separaciones de los pisos de rotor Savonius se deben hacer más aerodinámicos de manera de permitir un flujo constante al interior del rotor, y así también obtener la máxima eficiencia.

Otras modificaciones que se han realizado a turbinas de eje vertical, donde como se ha mostrado anteriormente, se generan propuestas donde se combinan las fuerzas de sustentación y arrastre para girar el eje. En este caso, la corporación Arrowind [7] presenta una turbina de eje vertical con algunas modificaciones. Estas son, incluir un alabe con forma helicoidal unido mediante dos anillos en la parte superior e inferior, todo esto por una estructura inferior donde los autores dicen que se podría incluir el uso que se desee. Dentro de las ventajas que se mencionan, es que aparte de que los alabes estén orientados en el eje x e y, también se observa una orientación en el eje z, el cual es el eje axial de la turbina. Con esto se logra que el flujo de aire se dirccione inevitablemente hacia la parte superior saliendo por ahí, con esto se anulan los puntos muertos aerodinámicamente.

Otro punto que también mencionan los autores es que la turbina diseñada trabaja de mejor manera en caso de flujos turbulentos, mencionando también que dada la construcción de la turbina esta también genera turbulencia en la salida axial de esta. El diseño de Arrowind trabaja con fuerzas de sustentación y arrastre, el arrastre es usado para girar el eje, mientras que la sustentación según los autores se genera para aliviar esfuerzos en la base de la turbina, así también para generar un balance de esta. Finalmente, los autores refieren que la turbina puede ser usada con un número determinado de alabes, estos podrían variar entre 2 y 10, pero también recomiendan que para una correcta eficiencia este número estuviese entre 3 y 5.

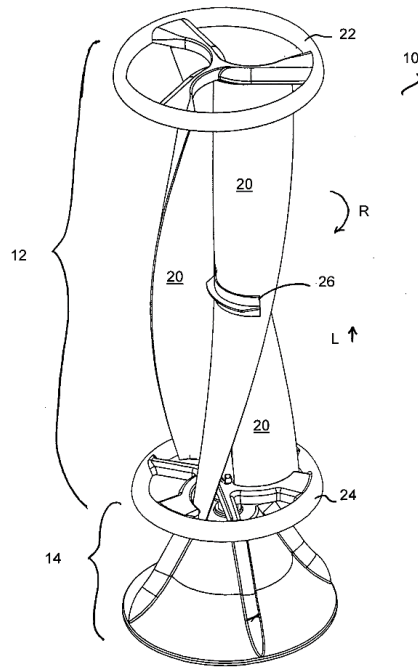


FIGURA 4.10 DISEÑO DE LA TURBINA PROPUESTA POR LA CORPORACIÓN ARROWIND “HELICAL WIND TURBINE”.

Siguiendo la misma línea de Arrowwind, también existen otras propuestas en torno a las turbinas verticales con rotor helicoidal. La siguiente patente fue propuesta por Hart [8] (Ver Figura 4.11), donde elimina el anillo superior en el cual están fijados los alabes. Hart menciona que el flujo de aire podrá ingresar desde cualquier dirección y su salida es axial, esto debido a los vórtices generados por el funcionamiento del rotor. El autor también menciona, que la eficiencia se ve incrementada en gran parte al poder captar un mayor flujo de aire debido a la diferencia de presión presente en el centro del rotor. En cuanto al ruido, se señala que es menor que el promedio de las turbinas, destacando que puede ser usada en ciudades sin ninguna dificultad.

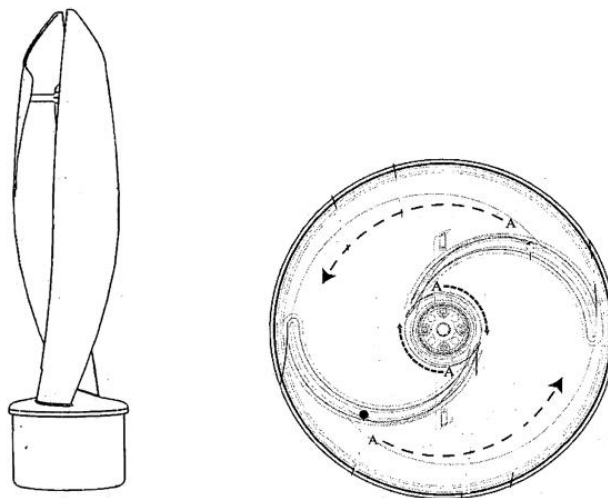


FIGURA 4.11 DISEÑO DE LA TURBINA PROPUESTA POR HART “HELICAL TAPER INDUCED VORTICAL FLOW TURBINE”.

Otro diseño similar al de Warner es “Eolienne a axe verticales” [9] un aerogenerador de tres hélices helicoidales, que incorpora pestañas superiores e inferiores que conectan la hélice con el eje vertical de rotación las que actúan como una especie de aleta Savonius facilitando la auto partida de la turbina eólica, incluso con poco viento. Esto también proporciona una mayor estabilidad durante regímenes turbulentos y reduce al mínimo el ruido mecánico generado por la rotación y el ruido aerodinámico generado por el frenado del viento entre las hélices.

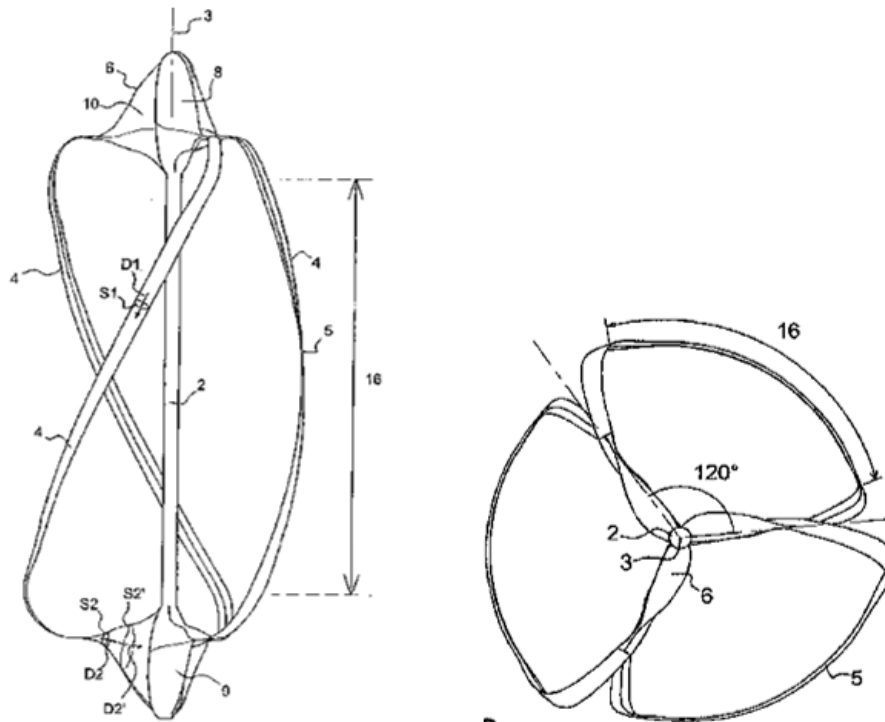


FIGURA 4.12 DISEÑO DE M. PETITGENET, A. RAHMANI “EOLienne A AXE VERTICALES”.

4.2. Turbinas elaboradas

Adicionalmente a las patentes que tienen relación con la investigación, se buscaron artículos tecnológicos que pusieran en evidencia alguna de las turbinas propuestas. Con esto, y con relación a la patente propuesta por Roberts, se realizó un estudio por Ansori y Herlamba [10] con fecha de agosto del 2016, donde se estudió el comportamiento de una turbina similar a la descrita en la Figura 4.9. En este estudio se utiliza un túnel de viento para evaluar distintas características de las dos turbinas a ensayar, una con alabes direccionales y otra sin alabes. Se midieron parámetros como la velocidad característica y coeficiente de potencia descrito en secciones anteriores de esta revisión.



FIGURA 4.13 TURBINA CON ALABES ORIENTABLES “PERFORMANCE OF COMBINED VERTICAL AXIS WIND TURBINE BLADE BETWEEN AIRFOIL NACA 0018 WITH CURVE BLADE WITH AND WITHOUT GUIDE VANE”.



FIGURA 4.14 TURBINA SIN ALABES ORIENTABLES “PERFORMANCE OF COMBINED VERTICAL AXIS WIND TURBINE BLADE BETWEEN AIRFOIL NACA 0018 WITH CURVE BLADE WITH AND WITHOUT GUIDE VANE”.

Dentro de las conclusiones del estudio, se obtuvo que la turbina con alabes orientables podría tener un 150% más de torque y coeficiente de potencia, esto en base a las mediciones realizadas. Por otro lado, la adición de los alabes orientable permitiría que la turbina de eje vertical partiera por sí sola, eliminando una de las desventajas que tiene este tipo de tecnología.

En otro estudio (Ver Figura 4.15)[11] se realizaron pruebas a una turbina eólica de eje vertical y alabe recto, los cuales están montados sobre un eje giratorio, el diseño contempla que los alabes sean de geometría simétrica y que su ángulo de ataque sea cero, es decir, el ángulo de la cuerda del álabe (línea imaginaria que en la sección transversal, pasa por el borde de ataque y el borde de salida) forma con el brazo o sistema de sujeción a la estructura en la que este montada.



FIGURA 4.15 PROTOTIPO TURBINA DE TRES ÁLABES “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL PARA GENERACIÓN DE BAJA POTENCIA”.

La turbina logro generar una cantidad de potencia cercana a los 44 W, operando en regimenes de viento superiores a los 10 m/s lo que supone una eficiencia de generacion del 7%. Se concluyo que el modelo no tenia en cuenta aspectos complejos relacionados con la aerodinamica de los alabes y rugosidad de la superficie. La turbina requiere una velocidad de 3,5 m/s para dar inicio a la marcha. El análisis experimental con el prototipo demostró, no sólo puntos a considerar sobre la importancia de un diseño aerodinámico óptimo, sino que también refleja la importancia que deben tener un buen diseño de álabes, brazos y sistemnas de sujecion al eje central de la maquina, puesto que el balanceo y alineamiento del rotor es esencial en este tipo de rotores que concentran la masa y distribución de carga en los álabes a una distancia relativamente alejada del eje central.

El siguiente estudio, que hace referencia a la primera patente expuesta en este documento, es realizado por Abid y Karimov [12], en el cual se diseña, desarrolla y construye una turbina combinada entre la tecnología de Savonius y Darrieus. En el estudio se construye una turbina con materiales como fibra de vidrio, acero y aluminio, el uso de estos dependía para que tipo de turbina se usaría, donde en primera instancia para la del tipo Savonius se utilizó aluminio, mientras que para la base se usó un diseño de acero. Luego de realizar las primeras pruebas, el equipo tenía como potencia teórica a extraer del flujo de aire 150 [W], pero sin embargo como se aprecia en el Grafico 4.1 la potencia extraída de la turbina tiene un máximo de 35 [W]. Con estos resultados el estudio señala que es una baja eficiencia (23%), pero también de debe considerar que la eficiencia del generador utilizado es baja debido a su antigüedad. A pesar de lo anterior, el estudio concluyó que las modificaciones realizadas al diseñar una turbina híbrida, es que la velocidad de partida es menor en relación a la que se podría obtener si se trabajaran con las turbinas por separado.

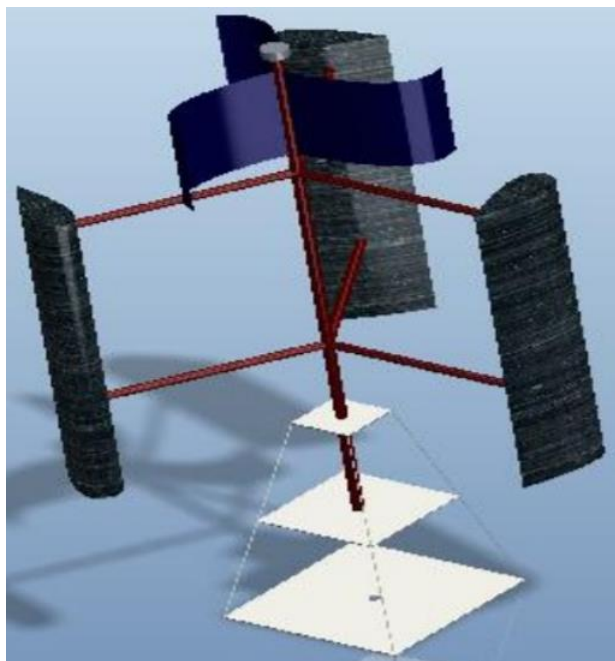


FIGURA 4.16 MODELO 3D PROPUESTO POR ABID Y KARIMOV, “DESIGN, DEVELOPMENT AND TESTING OF A COMBINED SAVONIUS AND DARRIEUS VERTICAL AXIS WIND TURBINE”.



FIGURA 4.16 TURBINA HIBRIDA FABRICADA POR ABID Y KARIMOV. “DESIGN, DEVELOPMENT AND TESTING OF A COMBINED SAVONIUS AND DARRIEUS VERTICAL AXIS WIND TURBINE”.

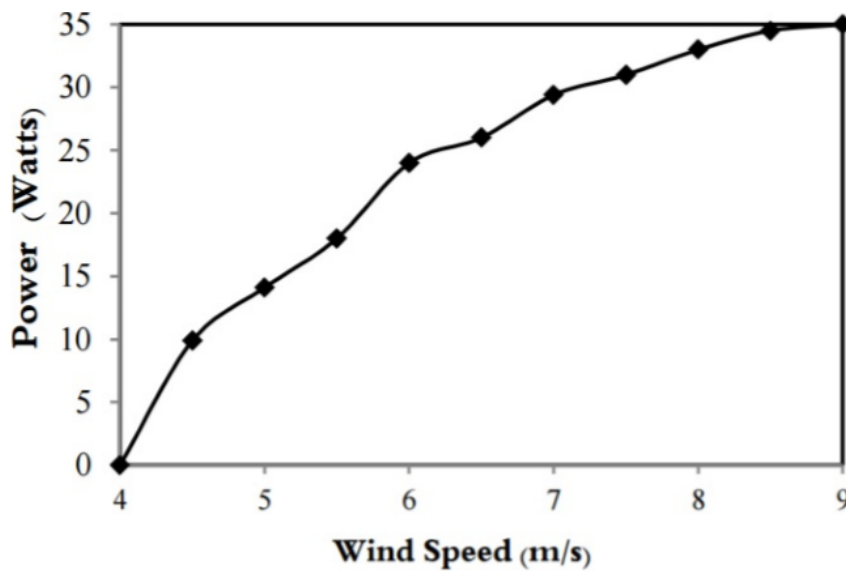


GRÁFICO 4.1 CURVA CARACTERÍSTICA DEL ESTUDIO DE ABID Y KARIMOV

Continuando con las aplicaciones y pruebas que se han realizado en turbinas, un grupo de estudiantes del BIET [13] (Bapuji Institute of Engineering and Technology) de India, desarrollaron una turbina muy similar a la de la Figura 4.11, donde se diseña y construye una turbina con alabes helicoidales. La turbina fue fabricada en base al material de aluminio, y su aplicación principal era el uso en carretera, de esta manera se verificaría la operación de la turbina frente a condiciones turbulentas. En el estudio se midió la velocidad del viento en diferentes áreas de la carretera, y en base a esto se instaló la turbina en el medio de las dos pistas de la carretera (ver Figura 4.18). Luego de realizar las mediciones correspondientes con 3 velocidades de distintas, el estudio determina que la eficiencia promedio que se alcanzó para esta turbina es del 44%. Una de las conclusiones, es que mejorando el alternador utilizado para generar electricidad y también los materiales sería posible obtener una mejor eficiencia.

Por otra parte, también se plantea como una posibilidad de mejora, el contar con alabes más aerodinámicos, puesto que el estudio señala que se alcanzan potencias de hasta 600 [W].



FIGURA 4.17 TURBINA APLICADA EN UNA CARRETERA. “DESIGN AND FABRICATION OF VERTICAL WIND TURBINE FOR POWER GENERATION AT HIGHWAY MEDIANS,”

El último estudio consultado también realiza una combinación de dos tipos de rotores [14]. Se titula como “Experimental Investigations of Hybrid Vertical Axis Wind Turbine” y fue presentado en la conferencia internacional de energía, medio ambiente y sustentabilidad (EESD 2016).



FIGURA 4.18 DISTINTAS COMBINACIONES DE ROTORES PRESENTADOS EN EL EESD 2016. A LA IZQUIERDA LA CONFIGURACIÓN A, EN EL CENTRO LA CONFIGURACIÓN B Y A LA DERECHA LA CONFIGURACIÓN C. “EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF HYBRID VERTICAL AXIS WIND”.

El estudio tiene como objetivo buscar la mejor configuración de los rotores, para esto se experimentan 3 opciones. En primer lugar, se prueba con una configuración compacta, es decir, con el rotor Savonius en el centro del eje. Por otro lado, también se experimentan con configuraciones totalmente separadas pero unidas al mismo eje, como se puede ver en la Figura 4.19.

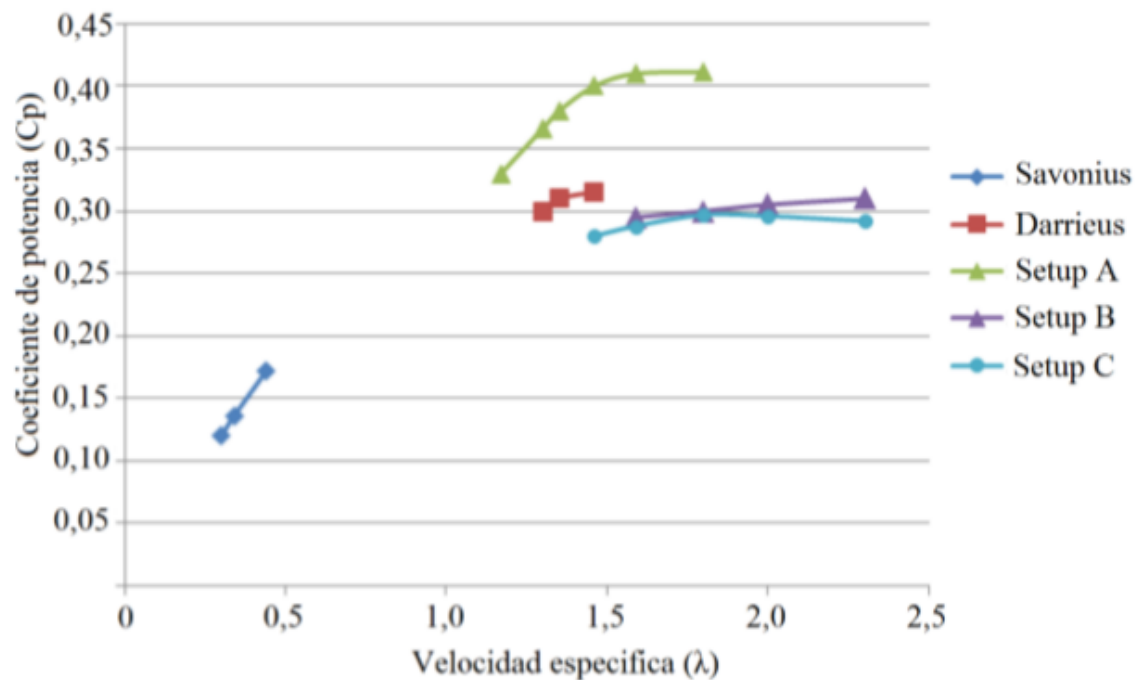


GRÁFICO 4.2 RESULTADOS OBTENIDOS DEL ESTUDIO PRESENTADO EN EESD 2016.” EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF HYBRID VERTICAL AXIS WIND”.

Dentro de los resultados del estudio, se tiene que la configuración compacta del rotor presenta un mejor rendimiento a la hora de evaluar la potencia de salida, esto se logra llegando a una eficiencia de hasta un 42% para la configuración A. Es importante destacar que el estudio también realiza pruebas separadas para cada rotor, es decir, para un rotor Savonius y Darrieus, logrando eficiencias que están dentro del margen de las eficiencias ya conocidas para este tipo de rotores. Por otro lado, las configuraciones B y C, que representan a los rotores separados pero unidos al mismo eje, presentan eficiencias incluso por debajo de las evidenciadas en el rotor Darrieus.

4.3. Modelos comerciales

Continuando con la búsqueda de turbinas que brinden características tecnológicas importantes en torno a la problemática, se destacan a continuación modelos comerciales de turbinas eólicas.

El diseño de la turbina de eje vertical, propuesto por Hart, y comercializado por Windside [15], cuenta con un sistema diseñado para operar de manera confiable y segura durante más de 50 años bajo cualquier condición climática en entornos remotos o urbanos. La partida se produce entre 2-5 m/s, dependiendo el tamaño de la turbina.

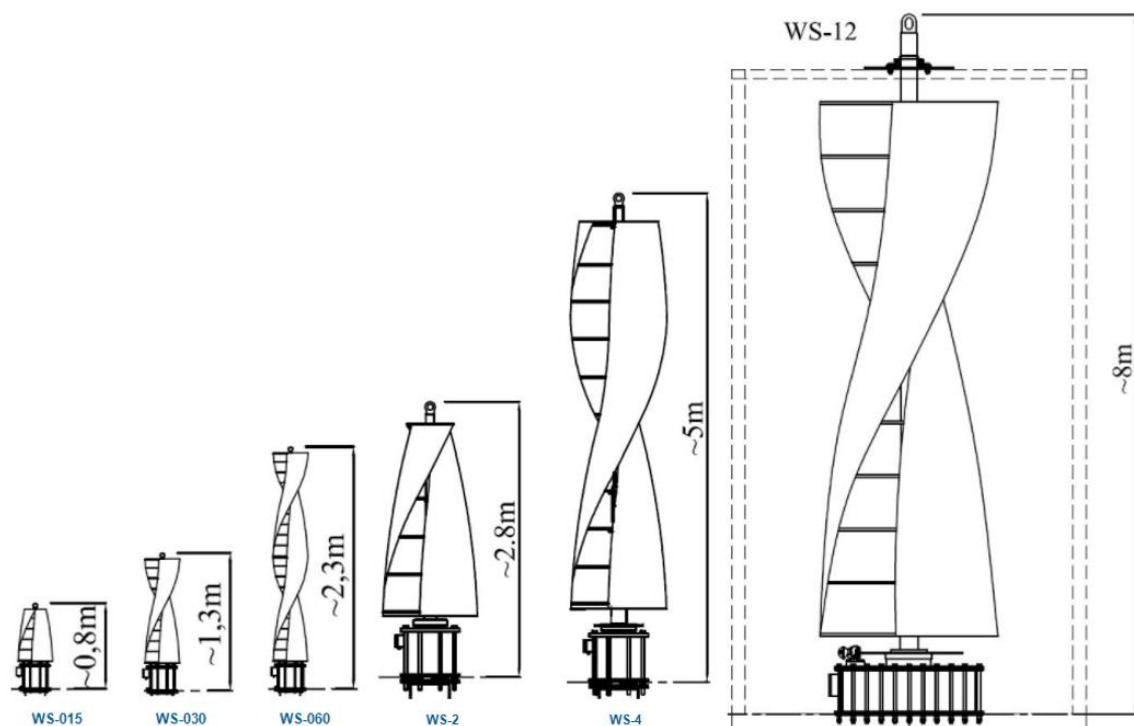


FIGURA 4.19 DIFERENTES MODELOS DE LOS AEROGENERADORES WINDSIDE. “WINDSIDE VERTICAL AXIS WIND TURBINES”.

Los 6 tamaños de aerogeneradores están diseñados para ofrecer rendimiento, fiabilidad y seguridad en condiciones de viento extremo de hasta 60 m/s (216 km/h) y en todas las condiciones climáticas.

TABLA 4.1 PRODUCCIÓN DE POTENCIA [KWH/AÑO] A DISTINTAS VELOCIDADES DE VIENTO. “WINDSIDE VERTICAL AXIS WIND TURBINES”.

Approximate Annual Power Production at Annual Average Wind Speeds*						
m/s	Output per Model (kWh/year)					
	WS-015	WS-030	WS-060	WS-2	WS-4	WS-12
4	15	30	60	120	400	720
5	40	80	160	700	2000	8640
8	96	192	384	1800	5200	22464
10	206	413	826	3900	11100	48298
*Indicative values only. Actual power output will vary according to conditions.						

La siguiente turbina comercial es la patentada por M. Petitgenet, A. Rahmani, esta turbina eólica está siendo comercializada por la empresa francesa Noveol [16] bajo el nombre de Nov'Turbine, su experiencia es el resultado de años de diseño (cálculos científicos, validación en laboratorio y túnel de viento) e ingeniería (túnel de viento, pruebas de campo, y optimización) con el objetivo de mejorar las turbinas de viento de baja potencia existentes. En la Figura 4.21 se puede apreciar las características principales de la turbina.

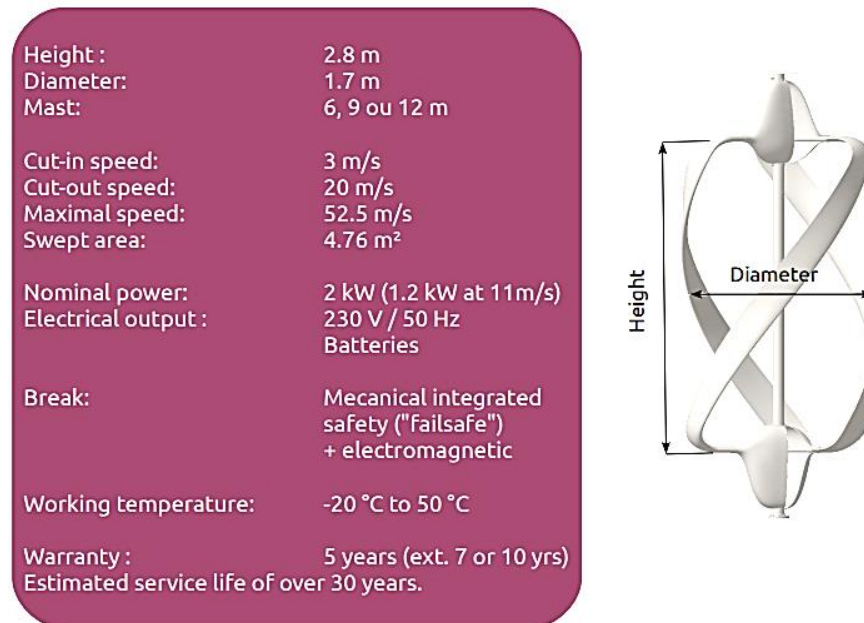


FIGURA 4.20 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE NOV'TURBINE FAMILIAR. "VERTICALE AS TURBINE VAN NOVEOL, NOVEOL SPECIFICATIONS, NOV'TURBINE".

La potencia instantánea es función de la velocidad del viento. Tan pronto como hay una bocanada de aire (3 m/s), la nov'turbine comienza a girar y genera más y más potencia hasta que el viento es tan rápido como 15 m/s. Si el viento es más fuerte, la tarjeta de control regula automáticamente la velocidad de rotación, lo que permite una seguridad completa. Después de 20 m/s, la turbina se detiene automáticamente. La potencia nominal es de 1.2 KW con vientos de 11 m/s.

Otro aerogenerador es el VentCat [17], basado en las turbinas Darrieus. El diseño de la hélice es muy similar, pero en el aerogenerador VentCat (Ver Figura 4.22), se diseñan de tal manera que la parte central de las aspas es más ancha que la de los extremos, de esta manera se ha conseguido obtener un mayor par de arranque y una mayor aceleración de las aspas. Consta de unas finas palas, con forma de ala de avión simétricas, que están unidas al eje sólo por los dos extremos, con una curva especial y helicoidal, para conseguir la mayor superficie útil de contacto posible, con la mínima altura. Gracias a la distribución de las 3 hélices con un desfase de 120°, se consigue un perfecto equilibrio dinámico a altas revoluciones. Diseñada para un máximo rendimiento entre las dos uniones del eje [18].



FIGURA 4.21 AEROGENERADOR VENTCAT. “VENTCAT, CARACTERÍSTICAS DARRIEUS S.F”

5. Propuesta de innovación tecnológica

Las turbinas eólicas convencionales de eje horizontal y/o vertical presentan problemas operativos debido a la dificultad de su orientación con el viento y el arrastre excesivo en presencia de vientos turbulentos.

Ahora que el problema se encuentra definido y realizado el estudio sobre el estado del arte, es necesario plantear una hipótesis sobre cómo llegar a una solución real del problema. Se realizó un estudio sobre el estado del arte de la problemática, llegando a que, si bien se han hecho diseños interesantes, capaces de evitar ciertos problemas, aún se puede mejorar en cuanto a tecnologías y diseños multipropósito que brinden mejores rendimientos.

Se plantea como hipótesis que una combinación de las turbinas presentadas en las Figuras 4.1 y Figura 4.10, maximizara el rendimiento en distintos flujos de viento. Se tendrá en cuenta el uso de materiales lo suficientemente livianos, así como también resistentes. Por otro lado, la combinación de estas turbinas tendría un amplio rango de velocidades para operar.

La turbina propuesta es capaz de aprovechar diferentes grados de libertad, siendo posible orientarla con diferentes ángulos de ataque para maximizar el aprovechamiento de la energía cinética del viento. La turbina híbrida tendrá un punto de partida a velocidades de viento más bajas que las turbinas convencionales. El diseño propuesto tendrá fácil modularidad, escalabilidad, interconectividad y portabilidad.

6. Objetivos de la investigación

El presente trabajo tiene como objetivo general desarrollar y probar un micro aerogenerador prototipo en base a un híbrido Darrieus-Savonius para aprovechar las virtudes tecnológicas de ambos tipos de turbina, reduciendo así el arrastre y maximizando la sustentación.

Los objetivos específicos contemplados son:

- Estudiar en profundidad las características de los principales diseños de aerogeneradores.
- Definir los parámetros fundamentales de diseño de la turbina híbrida para que sea interconectable, escalable y fácilmente transportable. Se deberá evitar el uso de transmisiones mecánicas entre el rotor y el generador eléctrico con el fin de minimizar pérdidas en la conversión energética.
- Dimensionar y estimar el rendimiento esperado del prototipo mediante simulaciones numéricas en diferentes regímenes de viento y turbulencia.
- Fabricar un prototipo del aerogenerador híbrido, interconectable, modular y liviano facilitando su adaptación para ensamblar un panel eólico.
- Realizar pruebas experimentales de funcionamiento del micro aerogenerador fabricado sobre la potencia generada y contrastar con los resultados numéricos.

7. Metodología diseño constructivo

En el presente trabajo, se utiliza una metodología de etapas para el desarrollo de un micro aerogenerador. Utilizando dimensiones específicas como parámetros que, al ser ingresados en una interfaz gráfica, generan un diseño CAD parametrizado, entregando la posibilidad de realizar distintos ángulos de desfase entre el alabe Savonius y el rotor Darrieus, permitiendo realizar simulaciones de análisis finito para encontrar el ángulo óptimo de desfase. El archivo CAD generado posteriormente se fabrica con la utilización de tecnología de manufactura aditiva para su posterior anclaje al micromotor y estructura de soporte. Entregando la posibilidad de realizar pruebas de potencia y rendimiento.

Dentro del desarrollo anterior, se realizan prototipos CAD con distintos ángulos de desfase y separación de alabes, los cuales serán analizados en ANSYS WorkBench 19.1, lo que dará como resultado la selección de un prototipo para su posterior fabricación en impresora 3D.

Además de determinar el ángulo de desfase optimo entre los alabes, se estudiará la separación entre ambos alabes. De no quedar satisfechos con los resultados obtenidos se realizarán cambios en la geometría del prototipo de manera de obtener un mejor resultado.

Se busca definir la geometría definitiva del prototipo, en base al micromotor se pueden definir los parámetros finales de diseño, el diámetro del eje del micro aerogenerador tiene directa relación con el eje del micromotor.

Finalmente, la metodología que se propone para el desarrollo del micro aerogenerador se resume en cinco pasos generales, subdivididos en tareas específicas para lograr el diseño requerido de la estructura, y se explica a continuación:

Paso 1: Realizar una descripción de los distintos modelos de aerogeneradores existentes mediante el uso de un estudio del estado del arte, en donde se identifica la diversidad actual de los diseños existentes. Se realiza una selección de modelo a trabajar y micromotor a utilizar. Esta etapa es esencial para identificar la función que debe cumplir el diseño a desarrollar.

Paso 1.1: Relacionar los componentes mecánicos del micro aerogenerador con el funcionamiento de este, identificando capacidades de los equipos relacionados con el diseño.

Paso 1.2: Identificar las variables necesarias para la selección del micromotor a utilizar, relacionando las variables físicas para la selección del equipo y dimensionales según el modelo estructural a desarrollar.

Paso 2: Desarrollar un diseño conceptual del micro aerogenerador que relacione la primera etapa con una estructura física virtual, según los requerimientos generales establecidos. En esta etapa se desarrolla un modelo CAD parametrizado que cumpla con distintos requerimientos dimensionales.

Paso 2.1: Identificar los requerimientos generales y específicos que formarán la base en el desarrollo del diseño CAD.

Paso 2.2: Desarrollar modelo CAD que cumpla con los objetivos especificados en la etapa anterior.

Paso 3: Desarrollar una simulación de elementos finitos en ANSYS WorkBench obteniendo valores de potencia y rendimiento.

Paso 3.1: Desarrollar un prototipo en CAD con los requerimientos necesarios para ensamblar con el micromotor.

Paso 4: Ejecutar la manufactura del prototipo micro aerogenerador desarrollado y soporte para el micromotor seleccionado utilizando un proceso manufactura aditiva en 3D.

Paso 4.1: Seleccionar el material de impresión correcto conforme a los requerimientos y pruebas a las que será sometido el prototipo.

Paso 4.2: Realizar la impresión en 3D del prototipo desarrollado con la finalidad de dar satisfacción a los requerimientos.

Paso 4.3: Acoplar estructura con micromotor seleccionado.

Paso 5: Evaluar el funcionamiento del micro aerogenerador desarrollado. Se realiza una prueba de funcionamiento del micromotor utilizado y su funcionamiento acoplado en la Turbina híbrida Darrieus-Savonius. El micromotor es conectado a un circuito eléctrico con sensores de voltaje e intensidad. Se disponen anemómetros en la entrada y salida del flujo que pasa a través del túnel de viento. En caso de fallas, se deben identificar y clasificar para posibles modificaciones posteriores, esto generara una curva de aprendizaje y diferentes prototipos de la turbina.

Paso 5.1: Se realizarán las mejoras necesarias al prototipo y se ensayara nuevamente el en el túnel de viento. A fin de descartar errores de diseño. Estas mejoras constructivas modifican el prototipo utilizado en las simulaciones.

8. Impresión por deposición fundida (FDM) 3D

Cuando la impresión 3D comenzó a dar sus primeros pasos era inimaginable que llegaría a los niveles de sofisticación que presenta actualmente. De tal manera que la Impresión 3D está dando lugar a la posibilidad de nuevos sistemas de fabricación que anteriormente eran imposibles de realizar. Es el caso de la fabricación de piezas articuladas o diseños muy complejos como los basados en celdas, que se están utilizando por ejemplo para la fabricación de huesos artificiales. Esto es posible por el sistema de trabajo de las impresoras 3D al imprimir por medio de capas, de forma que se pueden ir superponiendo, con gran precisión, hasta conseguir el objeto deseado y lo cual no es posible realizar con otro método de fabricación.

La impresión FDM es un proceso de fundición de plástico, que se logra a través de capas de filamentos en cada una de las piezas.

La tecnología de impresión 3D puede utilizarse para crear todo tipo de cosas, desde prototipos y piezas simples hasta productos finales altamente técnicos, como piezas para aeronaves, edificios ecológicos, implantes médicos que pueden salvar vidas e incluso órganos artificiales que se producen con capas de células humanas.

Existen diversos filamentos para realizar impresiones 3D [19], dependiendo el filamento con que se trabaje se obtendrán propiedades físicas completamente distintas, ya sea resistencia a la temperatura, flexibilidad, rigidez, adhesión con otros materiales entre otros. Se debe determinar los requerimientos a los que se someterá la pieza de impresión para elegir correctamente el filamento.

Otros factores que se deben considerar al modelar un proyecto son el tamaño del objeto, si el proyecto supera el tamaño del volumen de impresión, es posible reducir la escala del objeto o separarlo en partes para posteriormente ser ensamblado. El espesor de paredes también es un factor de criticidad, si son muy pequeñas, pueden ser demasiado frágiles como para sobrevivir al post procesamiento. El espacio libre entre piezas, durante la fabricación el objeto incorpora material de soporte que debe ser eliminado en el post procesamiento, si el espacio entre las partes es demasiado pequeño, el material de soporte se comprime y puede fundirse con la pieza.

A continuación, se definen las características de algunos de los filamentos más utilizados.

PLA: El ácido poliláctico (PLA) es un material amigable con el entorno que puede ser utilizado por diferentes tipos de impresoras en tercera dimensión. Su tamaño le brinda estabilidad por lo que no necesita una cama caliente, aunada a que el PLA requiere temperaturas más bajas permitiendo crear figuras más resistentes y sólidas. Es biodegradable, no tóxico, rendimiento estable.

ABS: El Filamento ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) es conocido por sus excepcionales propiedades mecánicas ya que permite crear fácilmente prototipos funcionales y partes complejas. El Filamento ABS es ideal para imprimir prototipos

funcionales en empresas automotrices. Alta resistencia, buena dureza, Rendimiento estable. Propenso a agrietarse si se enfría demasiado rápido.

PETG: Uno de los materiales más interesantes para impresión 3D. Combina las mejores características de los dos plásticos más populares: propiedades mecánicas superiores a las del ABS y la facilidad de impresión y acabado del PLA. Elígelo para tus piezas más resistentes o cuando necesites soportar el ataque de productos químicos. Alta transparencia, buen brillo, buena dureza.

Flexible: Es un filamento con una fuerte unión de capas, semiflexible y resistente a los productos químicos. Es altamente versátil para aplicaciones industriales ya que posee una alta durabilidad, lo que lo convierte en la opción ideal para realizar proyectos de fabricación de caucho y plástico.

PC: El filamento PC (policarbonato), puede imprimir piezas fuertes y resistentes que conservan la estabilidad dimensional cuando se someten a temperaturas de hasta 110 °C. El filamento PC es perfecto para ingenieros y fabricantes que requieren moldes de impresión, herramientas y prototipos funcionales. Tienen una buena resistencia a altas temperaturas (125°C), buena transmisión de luz, material de alta dureza.

Nylon: El Filamento de Nylon (poliamida) es una gran opción para la impresión 3D, es utilizado por muchos fabricantes en todo el mundo, ya que es conocido por su impresionante durabilidad, alta resistencia al peso y a la corrosión, flexibilidad, baja fricción y la capacidad para soportar fuerza mecánica.

Fibra de Carbono: Este filamento está compuesto por un polímero (PLA) y por recortes de fibras de carbono (15 %). Estas incrustaciones de fibra de carbono logran un filamento PLA mucho más rígido. Esta mayor rigidez se logra a costa de una menor flexibilidad que convierte a este material ideal para realizar piezas que no está previsto que se doblen como pueden ser soportes, herramientas, hélices o carcasas de drones o similares.

TABLA 8.1 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE CUATRO TIPOS DE FILAMENTOS DIFERENTES.

ABS	PLA	FLEXIBLE	PVA
Temperatura de extrusión: ~ 240 ° C	Temperatura de extrusión: ~ 200 ° C	Temperatura de extrusión: ~ 210 ° C	Temperatura de extrusión: ~ 195 ° C
Requiere cama caliente > 70 ° C	Poca temperatura de cama caliente	Poca temperatura de cama caliente – 45° C	Poca temperatura de cama caliente – 45° C
Funciona bastante bien sin refrigeración de capa	Se beneficia enormemente de refrigeración de capa durante la impresión	Se beneficia enormemente de refrigeración de capa durante la impresión	-----
Peor adherencia, se necesita cinta de poliamida o laca	Buena adherencia a una gran variedad de superficies	Buena adherencia a una gran variedad de superficies	Buena adherencia con ABS y PLA
Se pueden unir piezas usando adhesivos o disolventes (acetona o MEK)	Se pueden unir piezas usando adhesivos específicos	Se pueden unir piezas usando adhesivos específicos	No se usa para imprimir piezas definitivas
Los humos son desagradables y nocivos en áreas cerradas	Humos no nocivos y olor más agradable	Humos no nocivos y olor más agradable	Es inodoro y no tóxico
Resistente a temperaturas altas	Poco resistente a temperaturas altas	Poco resistente a temperaturas altas	No resistente a altas temperaturas
Propenso a las grietas, delaminación y deformación	Propenso a la ondulación de las equinas y salientes	Gran resistencia a rotura del material por fatiga	Gran resistencia a rotura del material por fatiga
Más flexible	Más frágil	Capacidad de estiramiento moderados y recuperación de su forma una vez que se deje de estirar	Gran flexibilidad
Plástico derivado del petróleo	Plástico de origen vegetal	En base a PLA	Compuesto por Alcohol de polivinilo (75% aprox.), AliphaticPolyol (20%) y calcio (5%)
Favorito para uso industrial (Piezas Mecánicas)	Comúnmente usado para uso domestico	Partes táctiles suaves de herramientas, elementos protectores, pulseras, collares, decoraciones, juguetes flexibles, etc.	Ideal para ser utilizado como material de soporte

A continuación, se presentan algunos modelos de impresión 3D de turbinas de eje vertical. Los cuales son de licencia libre para su utilización y mejoramiento. Cabe destacar que los modelos de gran tamaño se deben hacer modularmente, Valcrow es uno de ellos. Las impresoras 3D generalmente tienen volúmenes de impresión de 223 x 223 x 205 mm. [20].

Una turbina de viento de eje vertical, de fácil arranque, diseñada con alabes helicoidales para la recolección de viento doméstico, se puede adaptar a cualquier aplicación (Figura 8.1).

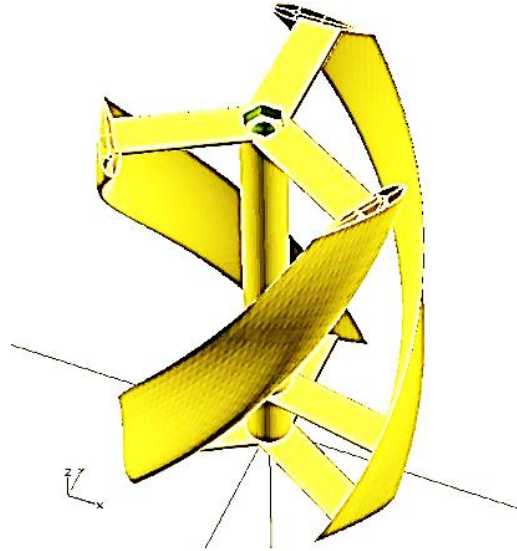


FIGURA 8.1 Mk2 FREE 3D.

Savonius Gorlov VAWT [21]. Es una turbina de viento axial vertical de arranque automático diseñada para la recolección de viento doméstico, pero se puede adaptar a cualquier aplicación. Cuenta con una turbina tipo Savonius en su interior y alabes helicoidales en su exterior tipo Darrieus. El Perfil de alabes es NACA 0015 (Figura 8.2).

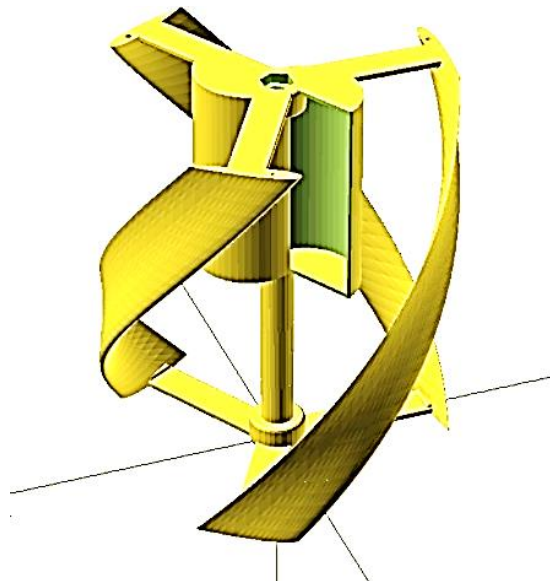


FIGURA 8.2 SAVONIUS GORLOV VAWT. "GORLOV VAWT 3D PRINT MODELS"

Valcrow [22], este modelo de aerogenerador está diseñado para imprimirse en partes y acoplarse sin adhesivos ni sujetadores externos. El modelo es del tipo de *Aerogenerador de Eje Vertical*, o VAWT. Son diseños modernos de molinos de viento que colocan el generador y la caja de cambios cerca del suelo, lo que facilita el mantenimiento y la reparación de la turbina. Debido a que se instalan en una dirección vertical, las turbinas pueden funcionar en cualquier dirección y no necesitan mecanismos de detección y orientación del viento.

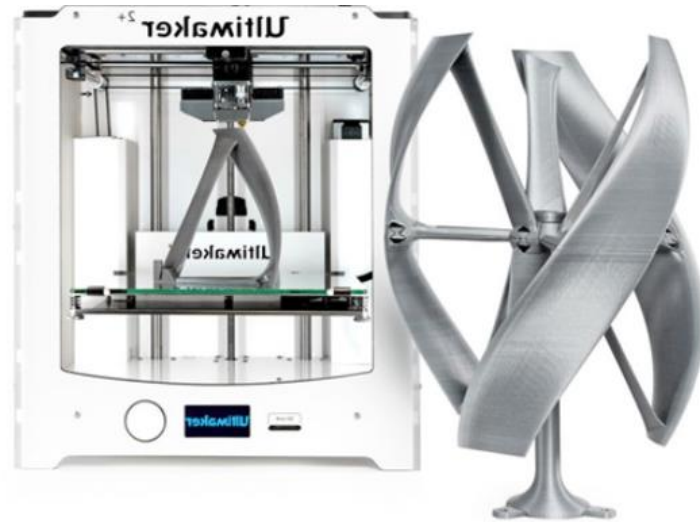


FIGURA 8.3 VALCROW MODULAR. “3D PRINTED VERTICAL AXIS WIND TURBINE VAWT MODEL”.



FIGURA 8.4 VALCROW DETALLES ENSAMBLE. “3D PRINTED VERTICAL AXIS WIND TURBINE VAWT MODEL”.

9. Diseño prototipo

Se diseñó el micro aerogenerador híbrido respetando las dimensiones de la impresora 3D (multimaker 2+) por lo que se realizaron prototipos que no superan las medidas 220x220x200 mm.

Se deben realizar análisis de elementos finitos en ANSYS FLUENT a los diferentes prototipos, determinando cual es el ángulo óptimo de desfase entre el alabe Savonius y el rotor Darrieus. Luego se debe verificar que estos análisis concuerden con los resultados experimentales.

9.1. Selección del perfil aerodinámico

Para la selección del perfil aerodinámico óptimo se realizaron simulaciones computacionales de elementos finitos a modelos con diferentes inclinaciones de álabe, esto se realizó de forma independiente para el rotor Darrieus y el rotor Savonius.

Una vez obtenido los alabes óptimos para cada rotor se debe encontrar la mejor unificación entre estos dos rotores. Se obtendrá un coeficiente de potencia en función del ángulo de rotación, obteniendo la eficiencia en función de la rotación y se analizará cual es la configuración que permite mantener este coeficiente de potencia constante en función del tiempo o rotación.

9.2. Diseño rotor Darrieus

En general, los tipos de perfiles utilizados comúnmente en las maquinas eólicas son de la serie NACA (National Advisory Committee of Aeronautics), y están determinados por un conjunto de cifras que definen su geometría (Ver Figura 9.1).

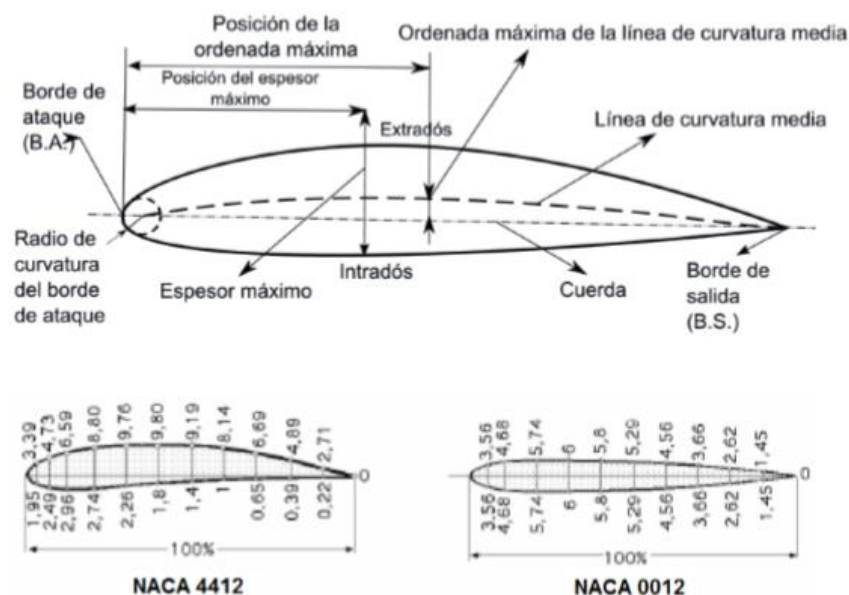


FIGURA 9.1 GEOMETRÍA DE UN PERFIL AERODINÁMICO Y CLASIFICACIÓN NACA DE CUATRO DÍGITOS.

Nomenclatura de perfiles NACA de 4 cifras:

- La primera cifra tiene un significado geométrico, e indica la máxima flecha de la línea media de la cuerda en %, proporcionando la máxima curvatura.
- La segunda cifra tiene un significado geométrico, e indica su posición, es decir, la distancia desde el borde de ataque hasta la posición de la máxima flecha de la línea media o máxima curvatura.
- Las dos últimas cifras indican el espesor relativo máximo en % respecto a la cuerda.

Los perfiles simétricos NACA 00XX tienen su espesor máximo cerca del 30% de la longitud de la cuerda a partir del borde de ataque y la línea de curvatura media coincide con la línea de la cuerda, esta es la razón por la que sus dos primeras cifras son cero (Ver Figura 9.1).

Con el fin de aprovechar al máximo la sustentación, los alabes deberían tener una forma simétrica aprovechando las propiedades aerodinámicas cuando el ángulo de ataque cambia de positivo a negativo.

Cuando el rotor gira, el aire avanza por el volumen que describe el rotor en funcionamiento, la corriente de aire se aproxima en una dirección específica que, se añade vectorialmente al viento, de modo que el flujo de aire resultante crea una variable pequeña positiva, en el ángulo de ataque del álabe. Esto genera una fuerza resultante que apunta hacia adelante a lo largo de una determinada línea de acción. Esta fuerza se puede proyectar hacia el interior del eje de la turbina a una cierta distancia, dando un par positivo en el eje. A medida que el perfil aerodinámico se dirige a la parte posterior del rotor, el ángulo de ataque cambia de signo, la fuerza resultante generada coincide con la dirección de rotación (Ver figura 9.2).

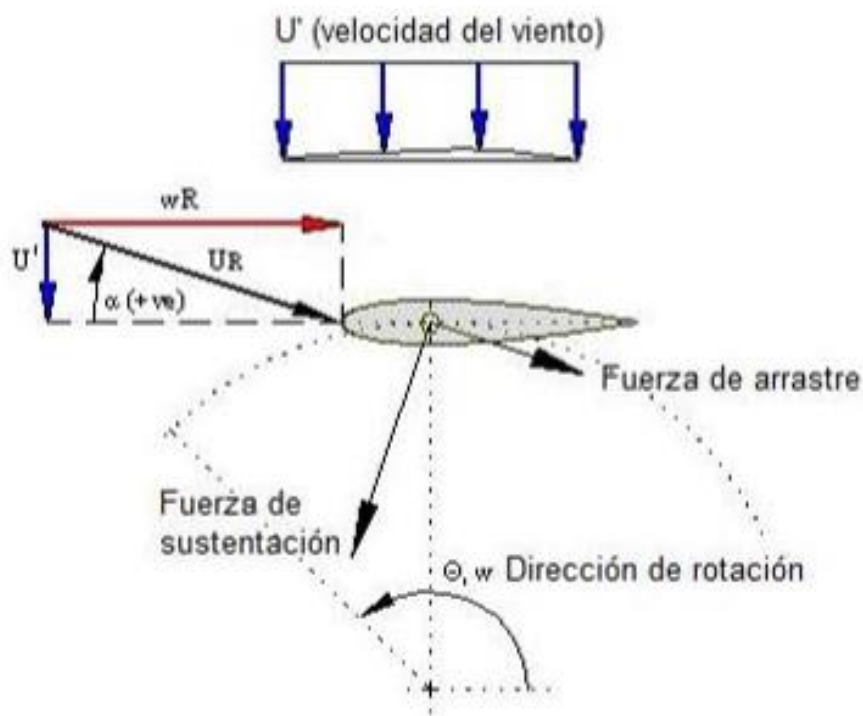


FIGURA 9.2. FUERZAS QUE SE GENERAN EN UN ÁLABE QUE COMPONE UN ROTOR DE ÁLABE RECTO.

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

Un aspecto de importancia del diseño es que el ángulo de ataque cambia cuando el rotor gira, de manera que cada álabe genera su par máximo en dos puntos de su ciclo (anverso y reverso de la turbina). Esto conduce a generar ciclo de carga sinusoidal (pulso) que complica de cierta manera el diseño, además este tipo de rotor presenta modos de resonancia, donde, a una

velocidad de rotación particular, las vibraciones pueden llegar a estar cerca de la frecuencia natural de los alabes, por tanto, un diseño óptimo debería contemplar esta situación en el caso crítico.

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

Se analiza el vector de velocidad que incide sobre los alabes en distintas posiciones angulares. La fuerza de elevación resultante siempre contribuye a la rotación del rotor, mientras que la fuerza de arrastre siempre se opone a la rotación. En la parte delantera, cerca de los 90° e igualmente, en los 270° , la componente de elevación es mucho mayor que la componente de arrastre, de modo que se produce par positivo. El par total por revolución será positivo, si se seleccionan perfiles adecuados, que en la configuración básica son de sección simétrica (Ver Figura 9.3).

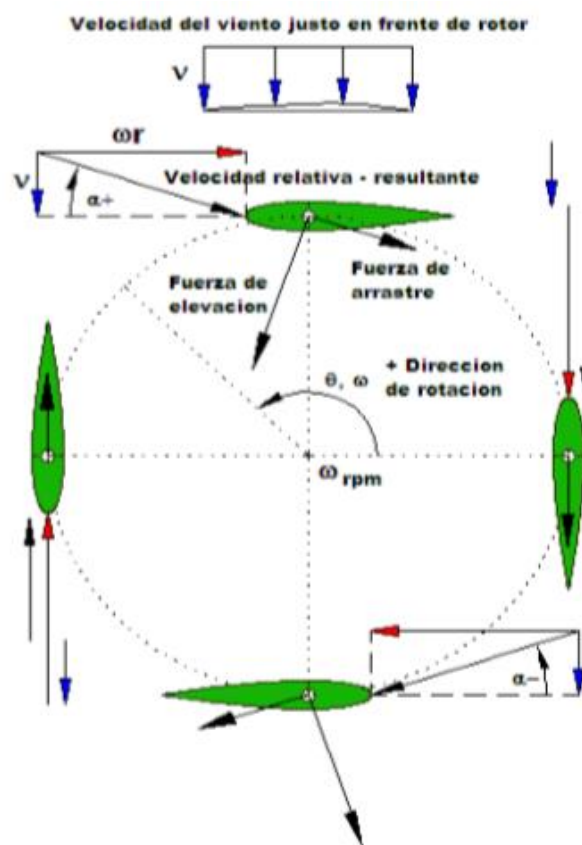


FIGURA 9.3 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO ROTOR DARRIEUS.

Para la generación del diseño se trabajó con un perfil NACA 0022 (Figura 9.4), el cual es simétrico y su espesor máximo representa un 22% del largo de la cuerda. Su elección fue en base a una serie de pruebas experimentales, donde se ponía en evidencia la eficiencia de distintos perfiles, siendo el perfil seleccionado el que obtuvo el mejor desempeño [23].

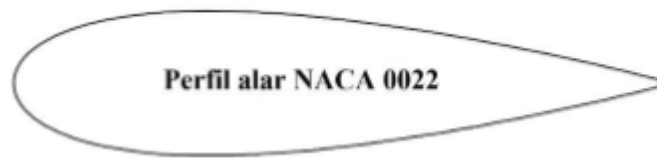


FIGURA 9.4 . PERFIL ALAR UTILIZADO PARA TODOS LOS ROTORES DARRIEUS MODELADOS.

Los rotores Darrieus de dos alabes se variaron en tres ángulos helicoidales, estos son; 60° , 75° y 90° . Los alabes se encuentran unidos a la estructura a través de una base inferior y superior, la cual le da rigidez al rotor (Ver Figura 9.5). A pesar de que se varió el ángulo helicoidal, hubo características que mantuvieron intactas para los 3 rotores modelados numéricamente, estas se pueden apreciar en la Tabla 9.1.

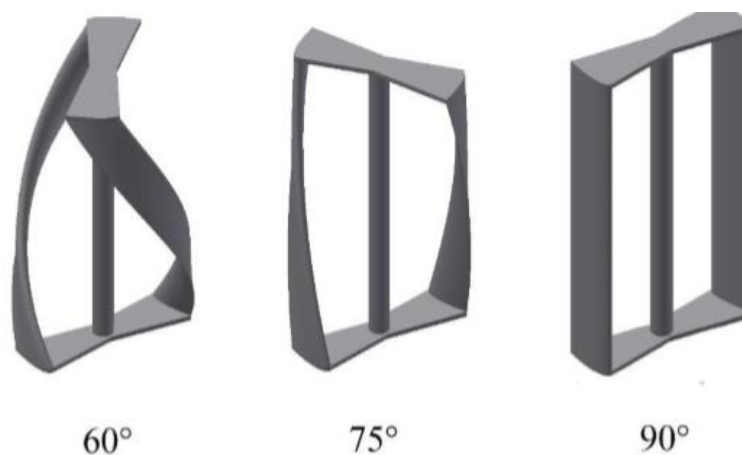


FIGURA 9.5 SANZANA, R. (2017) VARIACIÓN DE ÁNGULOS HELICOIDALES PARA ROTORES DARRIEUS DE DOS HÉLICES. RECUPERADO DE: [HTTP://HDL.HANDLE.NET/11673/22993](http://hdl.handle.net/11673/22993)

Si bien gran parte de los parámetros mostrados en la Tabla 9.1 son conocidos, es importante mencionar que se incorpora la característica denominada pitch, la cual relaciona la inclinación que tiene la cuerda del perfil alar con una línea tangente al diámetro del rotor.

TABLA 9.1. SANZANA, R. (2017) CARACTERÍSTICAS ASOCIADAS A LOS ROTORES DARRIEUS DE DOS HÉLICES. RECUPERADO DE: [HTTP://HDL.HANDLE.NET/11673/22993](http://hdl.handle.net/11673/22993)

Características	Valor
Radio	0,15 [m]
Altura	0,60 [m]
Largo de cuerda	0,10 [m]
Nº de alabes	2
Ángulo de pitch	0°
Solidez	0,66

Como se puede apreciar en la Figura 9.6, el ángulo de pitch también se puede relacionar con una línea radial desde el eje, donde este caso el ángulo que forma esta recta con la cuerda del

perfil forman un ángulo de 90° . Otra consideración del diseño es que el radio es medido desde el centro aerodinámico, esto quiere decir que se considera el radio desde el 25% del valor de la cuerda medido desde el borde de ataque. Al tener un largo de cuerda uniforme para todos los rotores (0,1 m), el centro aerodinámico del perfil queda establecido a 25 mm.

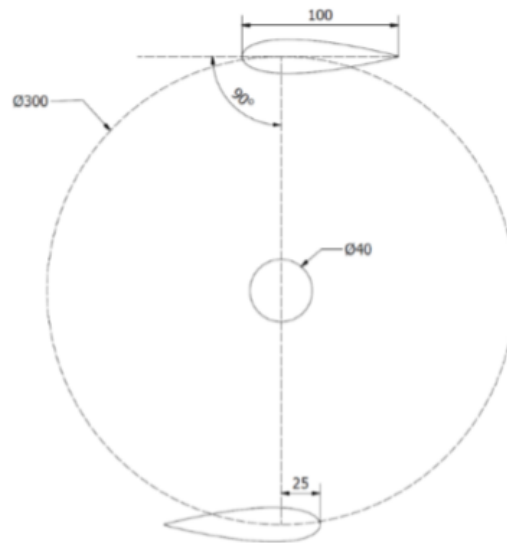


FIGURA 9.6 VISTA EN CORTE DEL ROTOR DARRIEUS DE DOS HÉLICES CON UN ÁNGULO HELICOIDAL DE 90° .

9.3. Diseño rotor Savonius

Este tipo de rotor cuenta con un alto grado de torque al ser accionado principalmente por fuerzas de arrastre.

El diseño más conocido del rotor Savonius es cuando el ángulo helicoidal se establece en 90° , es decir, recto. Adicionalmente a lo ya conocido, se establecieron 3 diseños donde su ángulo helicoidal varía desde los 40° hasta 60° con un paso de 10° (ver Figura 9.7).

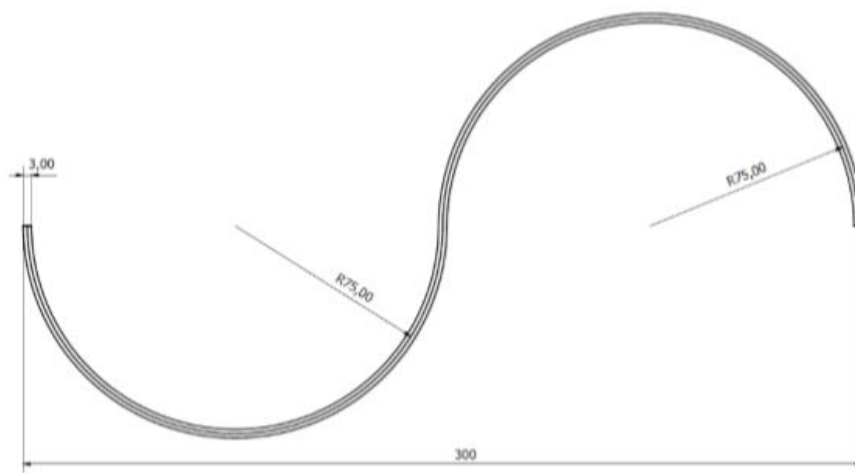


FIGURA 9.7 SANZANA, R. (2017) VISTA EN CORTE DEL ROTOR SAVONIUS DE DOS HÉLICES PROPUESTO CON UN ÁNGULO HELICOIDAL DE 90° . RECUPERADO DE: [HTTP://hdl.handle.net/11673/22993](http://hdl.handle.net/11673/22993)

Los rotores helicoidales se diseñaron con una chapa fluida, con esto se elimina el eje disminuyendo la masa, y, en consecuencia, colabora con una mejor auto partida al tener que vencer una menor inercia.

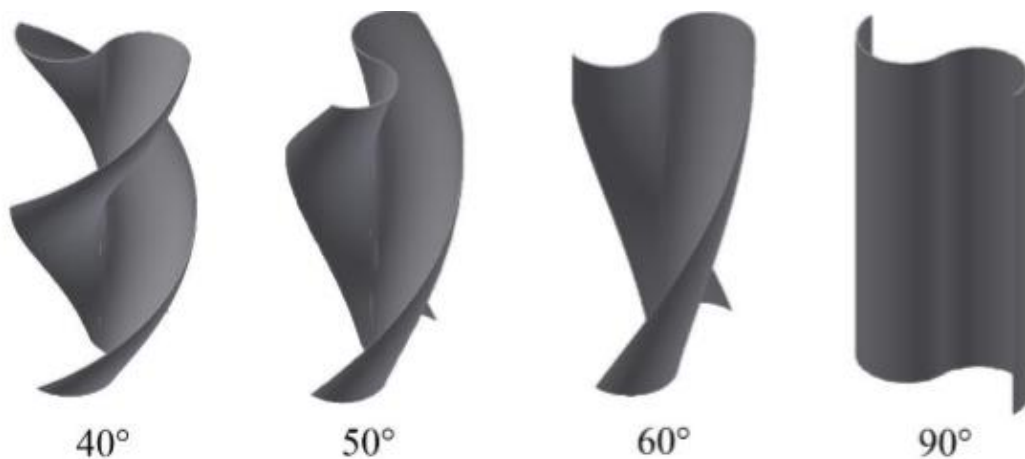


FIGURA 9.8 SANZANA, R. (2017) VARIACIÓN DE ÁNGULOS HELICOIDALES PARA ROTORES SAVONIUS DE DOS HÉLICES. RECUPERADO DE: [HTTP://HDL.HANDLE.NET/11673/22993](http://hdl.handle.net/11673/22993)

10. Análisis de simulaciones

Con el fin de comprender las distribuciones de presión y velocidad, así como también las características aerodinámicas de los distintos rotores en estudio, se realizaron modelaciones numéricas utilizando el software comercial de dinámica de fluidos computacional denominado ANSYS, específicamente en su versión 17.1 usando el paquete Fluent. Este paquete se basa en el método de volúmenes finitos (FVM en inglés), el cual permite resolver de forma numérica y aproximada un problema regido por ecuaciones diferenciales parciales, en este caso las ecuaciones de Navier-Stokes.

10.1. Análisis rotor Savonius

El resultado directo entregado por ANSYS corresponde al coeficiente de momento del rotor, en base a esto y la ecuación (1.8), es posible obtener el coeficiente de potencia medio para cada velocidad característica. Por lo tanto, como se puede ver en el Gráfico 10.1, para cada modelación numérica fue necesario obtener el valor medio del coeficiente de momento instantáneo obtenido.

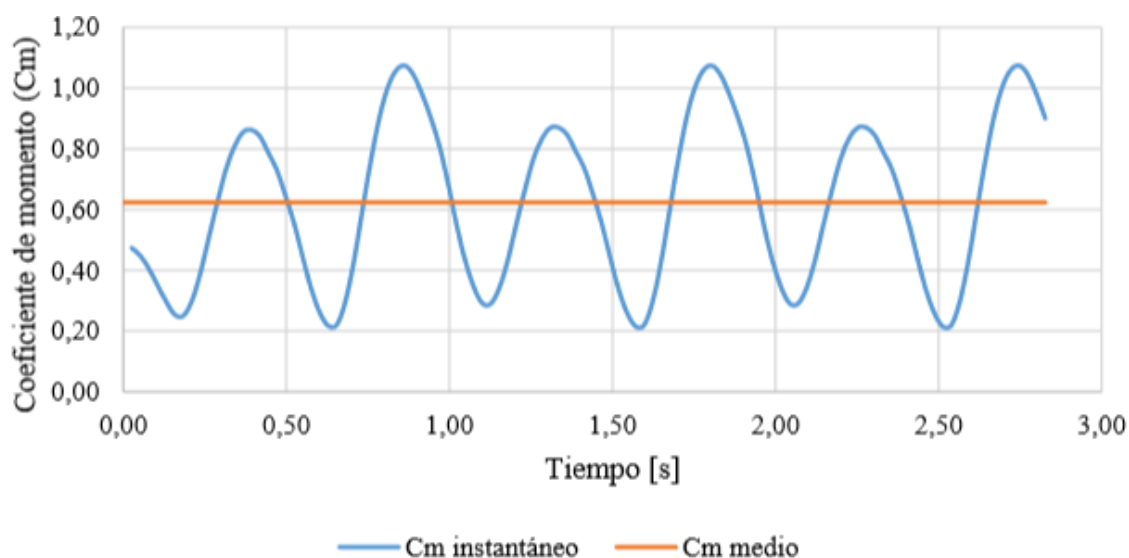


GRÁFICO 10.1 SANZANA, R. (2017) COEFICIENTE DE MOMENTUM EN EL TIEMPO PARA UN ROTOR SAVONIUS DE DOS HÉLICES, ÁNGULO HELICOIDAL DE 60° Y VELOCIDAD ESPECÍFICA DE 0,2. RECUPERADO DE:
[HTTP://HDL.HANDLE.NET/11673/22993](http://hdl.handle.net/11673/22993)

Realizando el mismo procedimiento exhibido en el Gráfico 10.1 para cada rotor, con su respectivo ángulo helicoidal y velocidad específica, se pudo elaborar la Tabla 10.1, la cual se puede interpretar como el rendimiento aerodinámico de cada rotor con dos alabes modelado.

TABLA 10.1 SANZANA, R. (2017) VALORES DE COEFICIENTE DE POTENCIA OBTENIDOS PARA ROTORES SAVONIUS DE DOS ALABES Y DISTINTOS ÁNGULOS HELICOIDALES. RECUPERADO DE:
[HTTP://HDL.HANDLE.NET/11673/22993](http://hdl.handle.net/11673/22993)

λ	Coeficiente de potencia (C_p)			
	40°	50°	60°	90°
0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,2	0,1294	0,1209	0,1247	0,1031
0,4	0,2249	0,1898	0,2706	0,1847
0,6	0,2392	0,1777	0,1981	0,1662
0,8	0,1532	0,0540	0,0735	0,0172
1,0	0,0545	0,0000	0,0000	0,0000

El Gráfico 10.2 corresponde a una representación gráfica de la Tabla 10.1. Con esto se deja en evidencia la curva característica de cada rotor, teniendo así que el rotor que alcanzó una mayor eficiencia aerodinámica corresponde al rotor con dos alabes y un ángulo helicoidal de 60°, alcanzando un coeficiente de potencia de 27,06% a una velocidad específica de 0,4. En el otro lado, se encuentra el rotor con el peor desempeño aerodinámico, el cual corresponde a la forma comúnmente conocida del rotor Savonius, es decir, con un ángulo helicoidal del 90°. Este rotor alcanzó una eficiencia de solo 18,47%, lo cual representa una disminución de 31,74% de rendimiento en comparación con el rotor propuesto que alcanzó la mayor eficiencia.

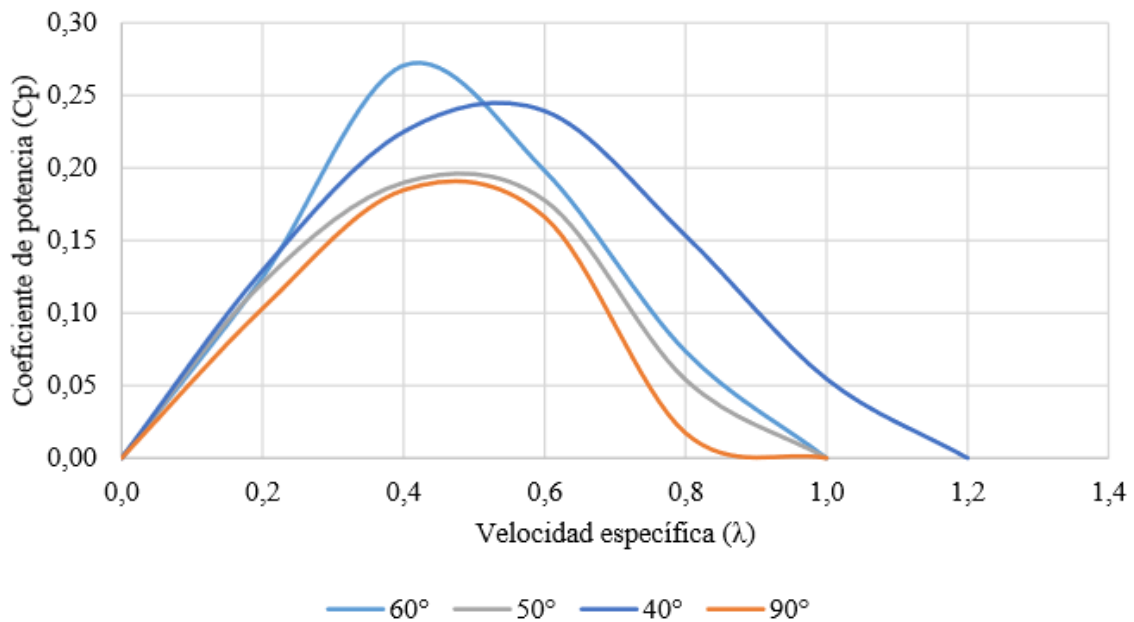


GRÁFICO 10.2. SANZANA, R. (2017) CURVAS CARACTERÍSTICAS PARA LOS ROTORES SAVONIUS CON DOS ALABES. RECUPERADO DE: [HTTP://HDL.HANDLE.NET/11673/22993](http://hdl.handle.net/11673/22993)

10.2. Análisis rotor Darrieus

Siguiendo el mismo procedimiento de variación de la velocidad angular para el rotor, dada en la Tabla 10.2, se obtuvieron los siguientes resultados en cuanto a curvas características (ver Tabla 10.3). Se puede apreciar en el Gráfico 10.3 que el rotor que obtuvo mejor desempeño aerodinámico fue el que presentaba un ángulo helicoidal de 75°, alcanzando una eficiencia de hasta 33% a una velocidad específica de 1,5. Si bien el rotor con un ángulo helicoidal de 90° obtuvo una eficiencia máxima similar, este presentaba un peor rendimiento cuando se evaluó a velocidades específicas inferiores. El rotor con el peor desempeño (60°) no alcanzó ni siquiera a superar el umbral de 25%, siendo incluso de peor rendimiento que varios rotores Savonius modelados computacionalmente.

TABLA 10.2 SANZANA, R. (2017) VARIACIÓN DE A VELOCIDAD ANGULAR Y PASO DE TIEMPO DE LAS MODELACIONES REALIZADAS PARA ROTOR DARRIEUS RECUPERADO DE: [HTTP://HDL.HANDLE.NET/11673/22993](http://hdl.handle.net/11673/22993).

Velocidad específica (λ)	Velocidad angular [rad/s]	RPM	Segundos por rotación [s]	Paso de tiempo [s]
0,0	0,00	0	0,0000	0,00000
0,5	16,67	159	0,3770	0,00524
1,0	33,33	318	0,1885	0,00262
1,5	50,00	477	0,1257	0,00175
2,0	66,67	637	0,0942	0,00131
2,5	83,33	796	0,0754	0,00105

TABLA 10.3 SANZANA, R. (2017) VALORES DE COEFICIENTE DE POTENCIA OBTENIDOS PARA ROTORES DARRIEUS DE DOS ALABES Y DISTINTOS ÁNGULOS HELICOIDALES. RECUPERADO DE:
[HTTP://HDL.HANDLE.NET/11673/22993](http://hdl.handle.net/11673/22993)

λ	Coeficiente de potencia (C_p)		
	60°	75°	90°
0,0	0,000	0,000	0,000
0,5	0,074	0,079	0,080
1,0	0,197	0,273	0,228
1,5	0,215	0,332	0,332
2,0	0,053	0,162	0,131
2,5	0,000	0,000	0,000

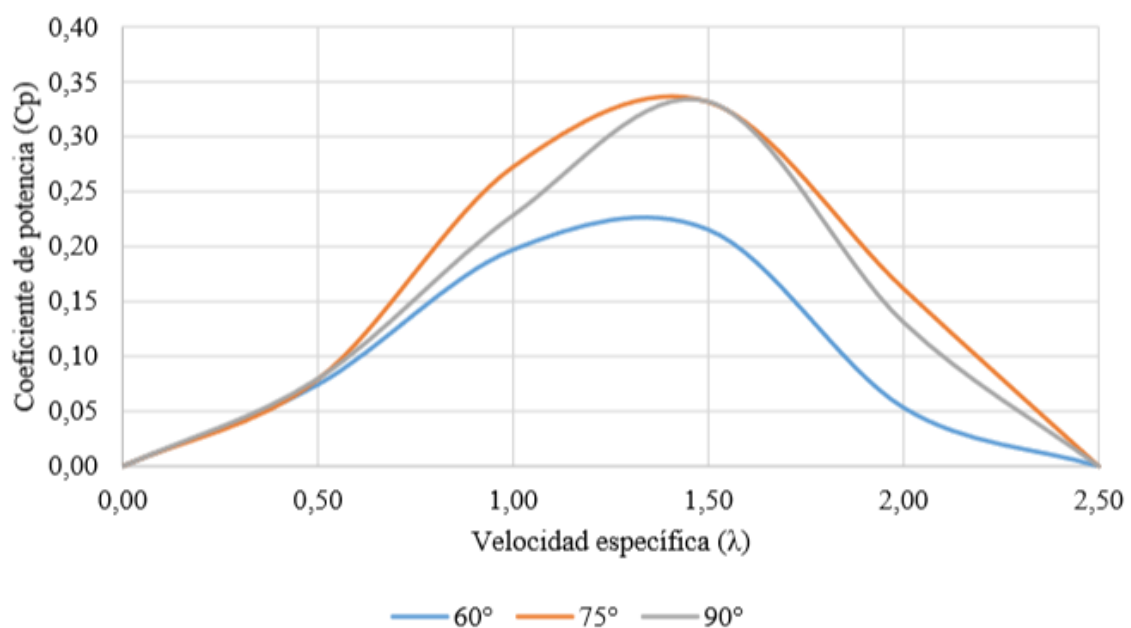


GRÁFICO 10.3. SANZANA, R. (2017) CURVAS CARACTERÍSTICAS PARA LOS ROTORES DARRIEUS CON DOS ALABES. RECUPERADO DE: [HTTP://HDL.HANDLE.NET/11673/22993](http://hdl.handle.net/11673/22993)

Siendo el objetivo principal del presente trabajo desarrollar un diseño híbrido de turbina eólica, el paso fundamental para lograr este nuevo diseño es proponer la forma en que se integraran los dos rotores seleccionados. Al observar las curvas características para todos los diseños preliminares del rotor Savonius (se tomaron en primera instancia los rotores con el mejor desempeño aerodinámico de acuerdo con su curva característica, finalmente se graficó en un solo gráfico para tener un panorama más amplio de los rotores con mejor desempeño. Al observar el Gráfico 10.4, se tiene como primer análisis que la incorporación de más alabes al diseño, si bien trae como consecuencia un coeficiente de momento con mayor constancia en el tiempo, este no va de la mano con una mejor eficiencia, siendo los peores en desempeño aerodinámico, esto se ve reflejado con una eficiencia que ronda en torno al 20%. Por lo tanto, en base a los resultados obtenidos para los rotores Savonius modelados numéricamente, en este caso se optó por seleccionar el rotor Savonius de dos alabes y un ángulo helicoidal de 60°, el cual finalmente presentaba un mejor desempeño alcanzando una eficiencia por sobre el 25%.

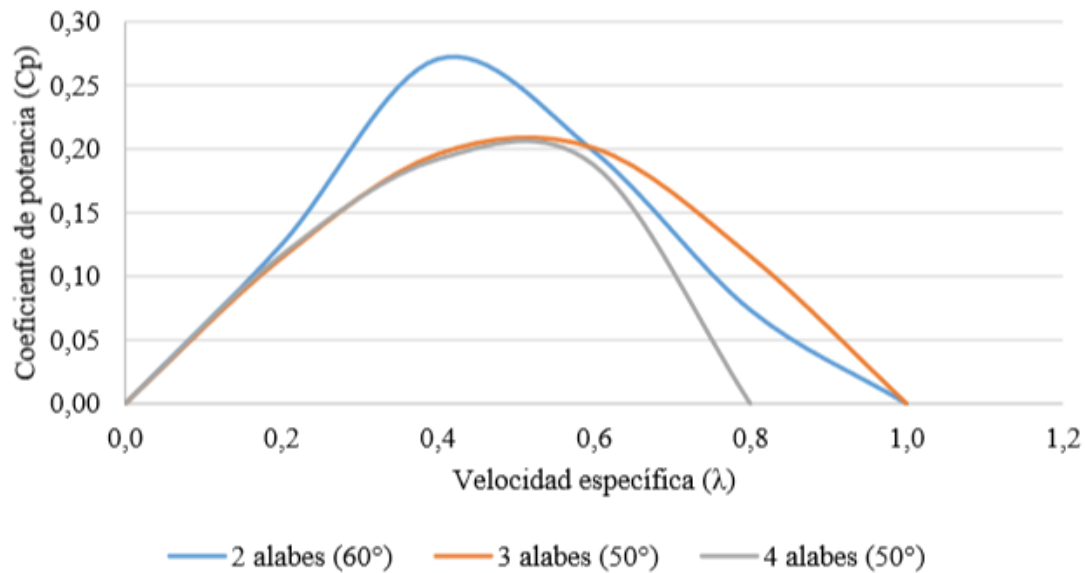


GRÁFICO 10.4. SANZANA, R. (2017) ROTORES SAVONIUS CON EL MEJOR DESEMPEÑO OBTENIDO COMPUTACIONALMENTE. RECUPERADO DE: [HTTP://HDL.HANDLE.NET/11673/22993](http://hdl.handle.net/11673/22993)

Siguiendo la misma metodología, se tomaron las curvas características de los rotores Darrieus con mejor resultados, tomando como la opción a integrar al rotor de dos alabes y un ángulo helicoidal de 75°, alcanzando una eficiencia de hasta un 33%. Al igual que los rotores Savonius, en este caso el hecho de agregar alabes al diseño también vio perjudicada su eficiencia, donde además al observar el Gráfico 10.5 se tiene que la mayor eficiencia para el rotor de tres alabes se da en una velocidad específica inferior, lo que se condice con la ecuación (3.8), ya que la velocidad específica de cierta forma también tiene relación con el coeficiente de momento, por lo tanto al agregar más alabes al diseño se tendrá una mayor cantidad de momento disponible a bajas velocidades específicas pero como consecuencia se generará un mayor arrastre que reducirá la eficiencia.

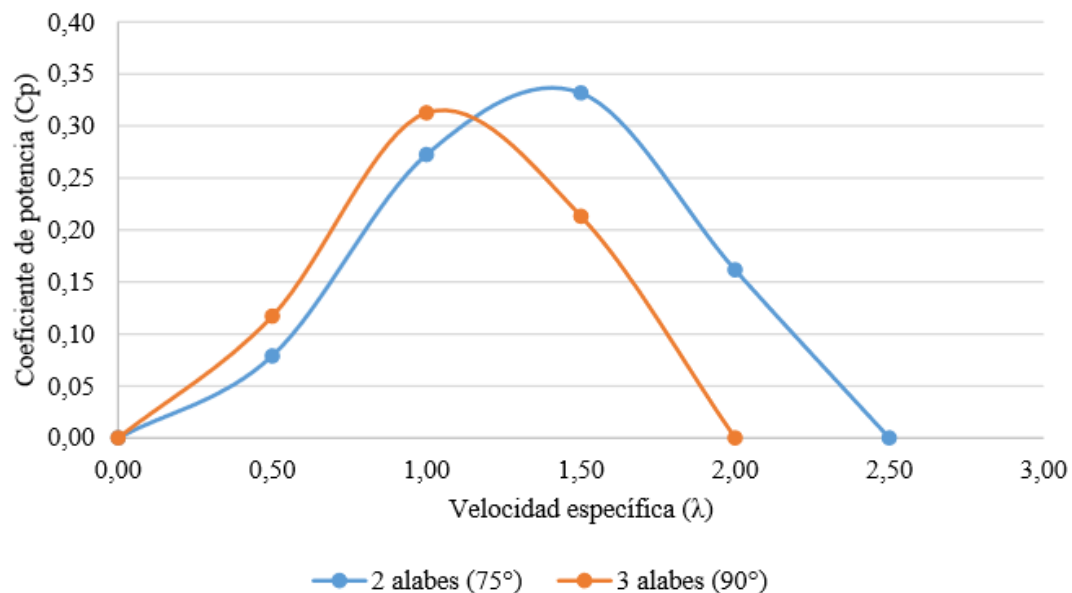


GRÁFICO 10.5. SANZANA, R. (2017) ROTORES DARRIEUS CON EL MEJOR DESEMPEÑO OBTENIDO COMPUTACIONALMENTE. RECUPERADO DE: [HTTP://HDL.HANDLE.NET/11673/22993](http://hdl.handle.net/11673/22993)

10.3. Configuración y diseño preliminar del prototipo.

Con la elección de los rotores a integrar realizada, el siguiente desafío correspondía a encontrar la mejor integración entre estos dos rotores. De acuerdo con las modelaciones realizadas, se tenía un coeficiente de potencia en función del tiempo, pero realizando algunas modificaciones y con el paso de tiempo utilizado, se podía obtener un coeficiente de potencia en función del ángulo de rotación. Para esto se tomó como referencia el ángulo 0 (ver Figura 10.1), es decir, el flujo vendría desde esa dirección, considerando también que el sentido de rotación sería en contra las manecillas del reloj.

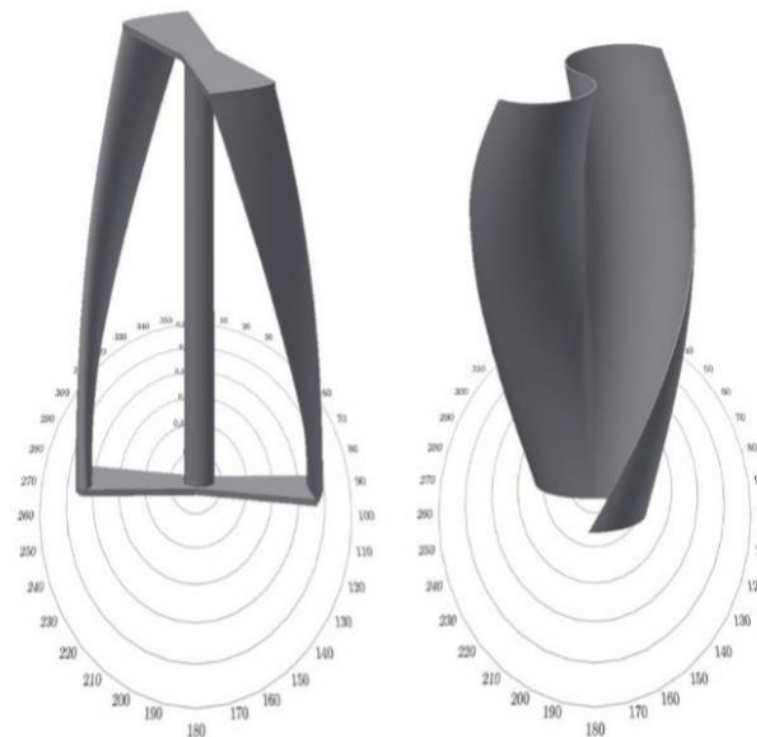


FIGURA 10.1 SANZANA, R. (2017) SISTEMA DE REFERENCIA PARA EL COEFICIENTE DE MOMENTO EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO DE ROTACIÓN. ROTOR DARRIEUS DE DOS ALABES Y UN ÁNGULO HELICOIDAL DE 75° (IZQUIERDA), ROTOR SAVONIUS DE DOS ALABES Y ÁNGULO HELICOIDAL DE 60° (DERECHA). RECUPERADO DE: [HTTP://HDL.HANDLE.NET/11673/22993](http://hdl.handle.net/11673/22993)

Con los ajustes correspondientes se pudo obtener lo observado en la Figura 10.2, donde se puede apreciar que la eficiencia no es constante a medida que los rotores giran, esto principalmente porque existen ángulos de rotación donde la interacción del flujo con el rotor no genera un coeficiente de momento favorable para la rotación, generando con esto que el flujo impacte en zonas del rotor donde no se genera un momento positivo, y en consecuencia una disminución de la eficiencia global. Una de las formas de solucionar este problema, era situando los rotores de tal manera que el punto de eficiencia máxima de un rotor estuviese en el punto de mínima eficiencia del otro rotor, con esto también se evitarían los posibles traslapes aerodinámicos entre los dos rotores, de tal forma que, a pesar de estar girando en el mismo eje, tuviesen un buen desempeño.

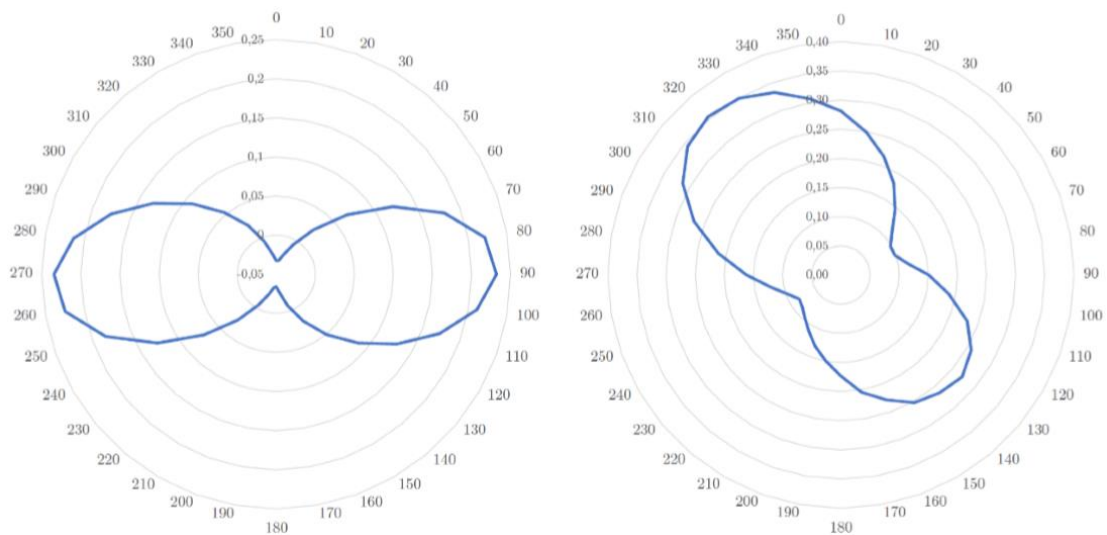


FIGURA 10.2 SANZANA, R. (2017) COEFICIENTE DE POTENCIA EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO DE ROTACIÓN PARA EL ROTOR DARRIEUS (IZQUIERDA) Y SAVONIUS (DERECHA) CON UNA VELOCIDAD ESPECÍFICA DE 0,5.
RECUPERADO DE: [HTTP://HDL.HANDLE.NET/11673/22993](http://hdl.handle.net/11673/22993)

Como se observa en la Figura 10.2, los puntos de eficiencia máxima para cada rotor son dos en todo su ángulo de rotación, dado principalmente a que los dos rotores presentan dos alabes, con esto si se deja el rotor Darrieus de manera fija, para que el punto de máxima eficiencia del rotor Savonius se sitúe sobre el punto de mínima eficiencia del rotor Darrieus, se tendría que rotar en el sentido horario al rotor Savonius en 35° (Ver Figura 10.3).

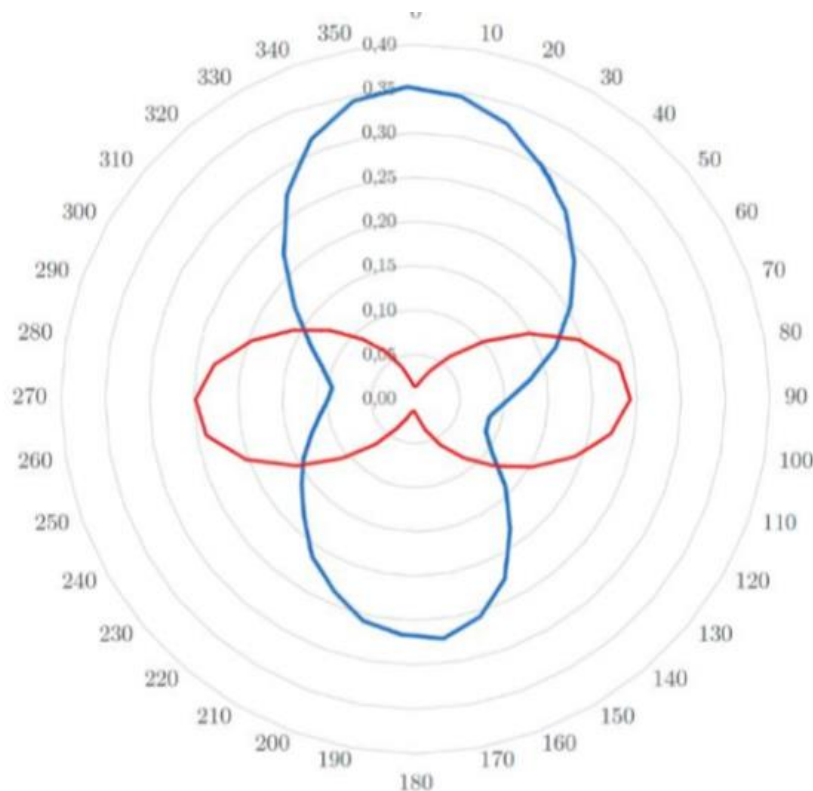


FIGURA 10.3. SANZANA, R. (2017) ROTACIÓN DEL ROTOR SAVONIUS DEJANDO EL ROTOR DARRIEUS FIJO.
RECUPERADO DE: [HTTP://HDL.HANDLE.NET/11673/22993](http://hdl.handle.net/11673/22993)

Para los prototipos se utilizaron las inclinaciones de ángulos óptimos antes estudiados, para el alabe Savonius se utilizó un ángulo helicoidal de 60° y para el rotor Darrieus un ángulo de 75° .

Los prototipos para analizar son los siguientes:

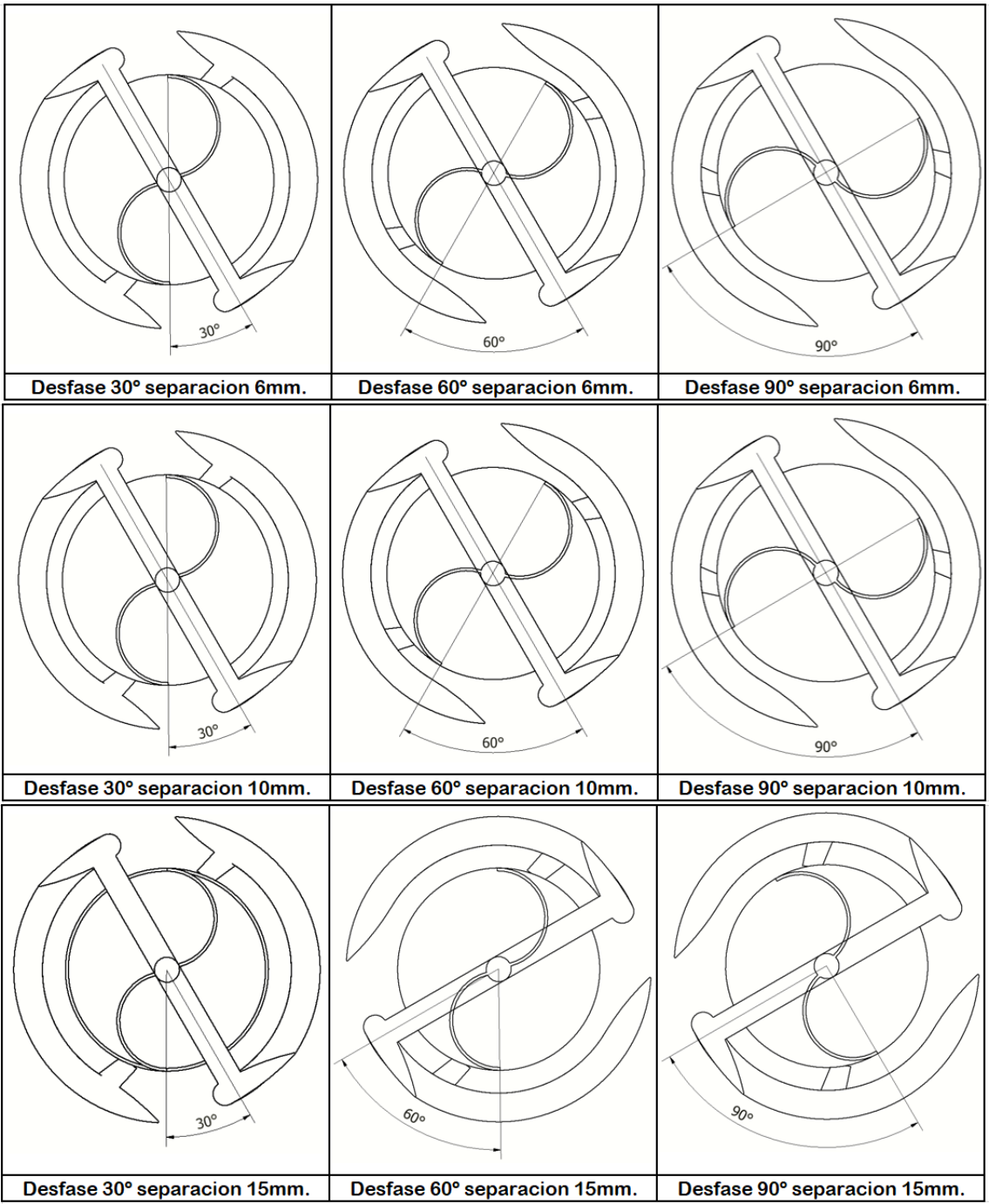


FIGURA 10.4 DIFERENTES CONFIGURACIONES DE ALABES SAVONIUS Y ALABES DARRIEUS PARA ANALIZAR EL COMPORTAMIENTO ANTE EL FLUJO DE VIENTO.

Se concluyó mediante los análisis computacionales que a mayor separación entre álabes Savonius y Darrieus del rotor híbrido se obtienen mejores resultados aerodinámicos, alcanzando el máximo punto de eficiencia a velocidades específicas menores que cuando la separación entre álabes es menor. Esta separación a su vez genera una mayor área transversal que interactúa con el flujo de viento. Con una correcta separación entre los álabes se tiene una buena interacción de flujo tanto con el rotor Savonius como con el rotor Darrieus. Como es de esperar, a una velocidad específica elevada la interacción baja considerablemente, donde para el flujo el rotor es simplemente un cilindro girando, por lo tanto, la interacción que tiene el fluido con la parte central del rotor es baja. Debe existir un equilibrio en la separación de álabes y las dimensiones de cada uno de estos. Cabe destacar que el comportamiento experimental difiere de los análisis y el flujo de viento simulado tiene una velocidad constante de 5 m/s, sabemos que la curva característica del rotor varía en función de la velocidad. Por lo que serán los análisis experimentales los que definan la separación óptima del rotor.

11. Selección del micromotor

Son máquinas eléctricas rotatorias que transforman la energía eléctrica en energía mecánica de rotación, debido a los campos magnéticos que afectan las bobinas de su núcleo. En nuestro caso el viento produce la rotación del micro aerogenerador el que traspasa esta energía cinética al eje del micromotor transformándola en energía eléctrica.

Para la selección del micromotor adecuado para nuestro micro aerogenerador, se consideraron variables relacionadas con el peso y tamaño del micromotor, lo que incide en el peso total del prototipo, los Volt producidos por revoluciones, lo que se relaciona directamente con la potencia que lograra generar el prototipo, el eje del micromotor y la manera de anclaje con el modelo CAD, ya sea mediante hilo o por ajuste a presión.

Se cotizó y compro tres micromotores (Ver Figura 35-38) que cumplieran con los requerimientos de tamaño y peso para las pruebas, a parte de estos tres micromotores, hay otros en existencia de un valor comercial mayor y dimensiones más grandes. Al realizar los ensayos experimentales se verificará el factor de pérdida en la conversión de energía mecánica a eléctrica, de no cumplir con una entrega de potencia aceptable, se deberá obtener un micromotor de mayor calidad, lo que conllevará también un mayor costo en la fabricación del micro aerogenerador.

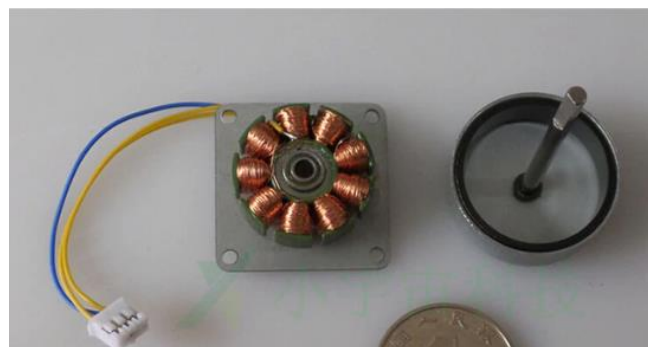


FIGURA 11.1 DETALLE MICROMOTOR MINIWIND.



FIGURA 11.2 MICROMOTOR MINIWIND.

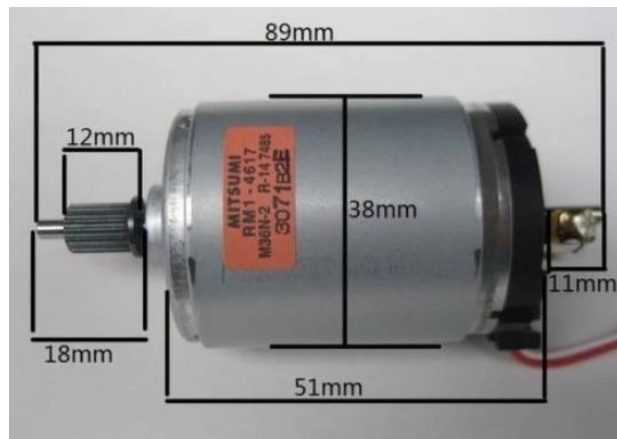


FIGURA 11.3 MICROMOTOR MITSUMI.

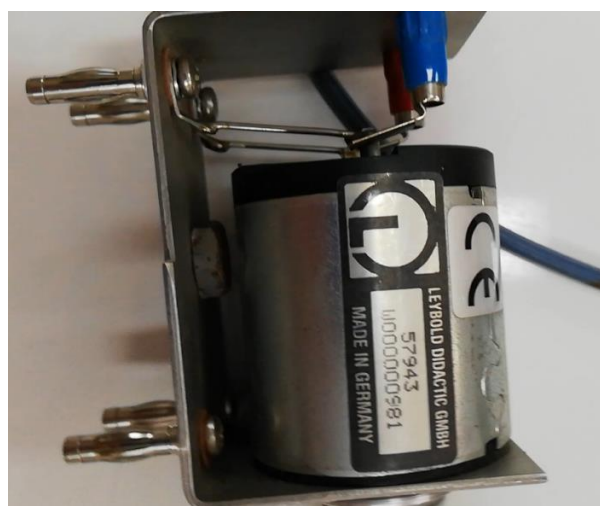


FIGURA 11.4 MICROMOTOR LEYBOLT DIDACTIC.

11.1. Ensayo tensión en vacío micromotores

Se midió en el Laboratorio de Física de la Universidad el voltaje producido por cada uno, para esto, se acoplaron a otro motor conectado a un variador de frecuencia que utilizo como fuente de potencia. El acople se realizó mediante los ejes, con lo que el motor acoplado al variador de frecuencia simulaba el torque que produciría la turbina híbrida una vez acoplada al micromotor.

Se obtuvo el voltaje producido por cada uno de los micromotores a diferentes rpm. Se seleccionó el micromotor que presento el mejor rendimiento en relación con las RPM (Tabla 11.1).

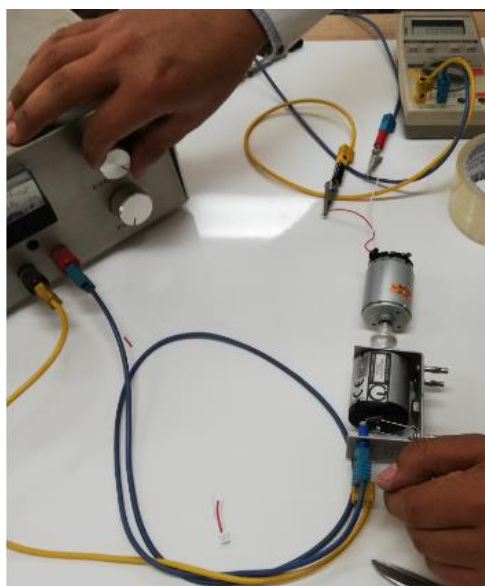


FIGURA 11.5 MEDICIÓN DEL VOLTAJE ENTREGADO POR MICROMOTOR MEDIANTE VARIADOR DE FRECUENCIA.

TABLA 11.1 VOLTAJE DE MICROMOTORES VS VARIADOR FRECUENCIA.

Comparativa variador frecuencia/Micromotor [V]					
Variador	Leybolt Didactic	Variador	Mitsumi	Variador	Miniwind
2,98	2,11	2,96	2,37	1,393	0,0074
3,05	2,46	3,06	2,77	1,531	0,0127
3,42	3,06	3,36	3,28	1,722	0,0159
3,6	3,3	3,5	3,5		
4,11	3,98	4,06	4,53		
5,02	4,52	4,96	6,03		
5,61	5,16	5,56	6,98		
6,5	6,04	6,34	8,18		
7,68	7,27	7,57	10,08		
8,83	8,55	8,75	11,99		
9,56	9,39	9,49	13,35		
10,3	10,21	10	14,16		
11	11,03	10,6	15,59		

Se puede apreciar por la Tabla 11.1 que el mejor rendimiento lo entrega el micromotor Mitsumi (Figura 11.3), Se realizara el prototipo de la turbina hibrida considerando el eje del micromotor Mitsumi para diseñar el acople, facilitando el anclaje entre micromotor y turbina hibrida. El tipo de anclaje es mediante presión y una resina que unirá ambas partes.

Descripción Micromotor Mitsumi:

- Velocidad de entrada: 2400-6800 rpm
- Tensión de salida: DC12V-38V
- Corriente de carga máx. 880ma
- La tensión de salida del motor está relacionada con la velocidad, cuanto mayor es la velocidad, mayor el voltaje de salida.
- Se puede utilizar por debajo de 12 V LED iluminación de la lámpara, carga del teléfono móvil, fuente de alimentación de la bicicleta, experimentos científicos e inventos, suministro de energía al aire libre y otros fines.
- Diámetro de salida del eje: 3.2mm
- Peso: 185g



FIGURA 11.6 MICROMOTOR MITSUMI Y CABLES CONECTORES.

12. Realización del prototipo

El prototipo se diseñó en Autodesk Inventor y luego se realizó la impresión 3D en Multimaker 2+. La impresión 3D, también conocida como manufactura por adición, es un proceso por el cual se crean objetos físicos colocando un material por capas en base a un modelo digital. Todos los procesos de impresión 3D requieren que el software, el hardware y los materiales trabajen en conjunto. (ver imagen 37), para el modelo se consideró el acople al micromotor Mitsumi, realizando a partir de esto un eje principal del que se proyectan dos alabes Savonius con inclinación de 60° , en los extremos se desprenden dos pestañas que conectan el eje del prototipo con los alabes Darrieus, los que tienen una inclinación de 75° . La separación entre los alabes es de 10 mm.

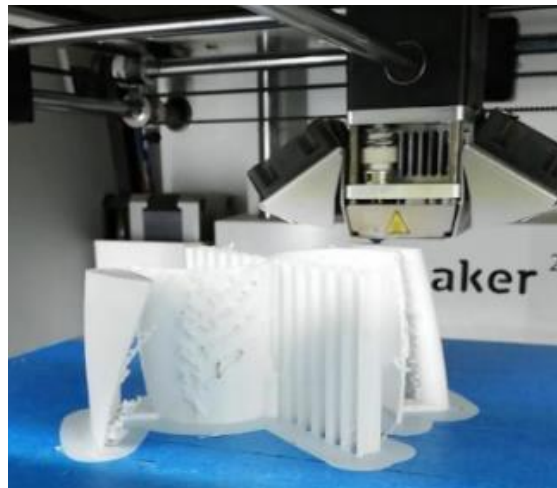


FIGURA 12.1 FABRICACIÓN PROTOTIPO V2 EN MULTIMAKER 2+.

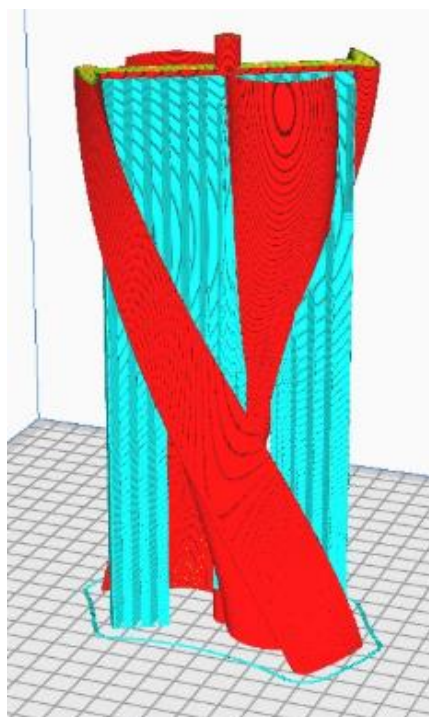


FIGURA 12.2 MODELAMIENTO DIGITAL DE LA TURBINA HIBRIDA PROTOTIPO V4.

12.1. Primer prototipo

El primer prototipo realizado tiene dimensiones de 100 mm de altura y diámetro 60 mm, el cual fue montado con éxito sobre el micromotor, Al realizar ensayos de funcionamiento se obtuvieron buenos resultados, pero este no cumplía con el arrastre necesario para generar un torque adecuado en el micromotor. Por lo que se descartó como un modelo ideal. Además de que al alcanzar velocidades superiores a 10 m/s sufrió daños estructurales en los alabes Darrieus.



FIGURA 12.3 PROTOTIPO VERSIÓN 1.

12.2. Segundo prototipo

En el segundo prototipo se solucionó el tema de las dimensiones, fabricando una pieza de 200 mm de altura y 100 mm de diámetro.

Con este prototipo se realizaron pruebas en el túnel de viento que se encuentra en el laboratorio de mecánica, el prototipo se dañó irreparablemente, concluyendo que las pestañas para unir los alabes Darrieus deben ser más resistentes, lo que se logra ampliando su tamaño y el grosor de estas. Otro cambio para realizar en el prototipo es la orientación y ángulo de desfase de los alabes Darrieus respecto a los alabes Savonius. Cabe destacar que el material de los prototipos hasta ahora había sido filamento ABS, con el cual se obtuvieron algunas fallas superficiales, que se espera sean mejoradas con el filamento PLA.



FIGURA 12.4 ENSAYO TÚNEL DE VIENTO SEGUNDO PROTOTIPO.

12.3. Tercer prototipo

El tercer prototipo se realizó con las mismas dimensiones que el segundo, se imprimió en filamento PLA, que entrega mejor calidad superficial, se mejoró la geometría, se ampliaron las pestañas que unen el rotor Darrieus al rotor Savonius, además de modificar la dirección del alabe Darrieus. Al realizar el ensayo en el túnel de viento se observaron mejoras considerables, aumento de rpm en función de la velocidad del viento en comparación a los prototipos anteriores, esta vez el prototipo no sufrió daños, aun así, se observó que a velocidades de viento por sobre los 12 m/s se producen vibraciones que dificultan el rendimiento del micro aerogenerador. Se modificará el prototipo realizando un agujero en la parte superior del eje en el cual se insertará un eje que este fijo a la parte superior del túnel de viento, evitando las vibraciones y mejorando la eficiencia.



FIGURA 12.5 PROTOTIPO VERSIÓN N°3

Respecto al micromotor Mitsumi, se verifico que el amperaje entregado por este micromotor no es suficiente para generar la potencia esperada, se estudiara la forma de adquirir otro micromotor que cuente con una mejor conversión de energía mecánica.

12.4. Cuarto Prototipo

El cuarto prototipo se realiza agregando una modificación geométrica respecto del tercer prototipo, un centralizador en la parte superior del eje, el cual permite no perder eficiencia por la oscilación de la turbina mientras se encuentra en rotación. Se realizó en PLA de color negro con un relleno del treinta por ciento (30%) y calidad de extrusión de 0.2 mm para entregar un acabado con mejores terminaciones que los prototipos anteriores. Se mantiene la inclinación de 75° del alabe Darrieus y la inclinación de 60° del alabe Savonius. Con el desfase respectivo de 35° en el mismo sentido.

Se logra un acabado prolijo en comparación a los prototipos anteriores, esto se debe fundamentalmente a que se utilizó una impresora 3D con mayor calidad de extrusión, sumado al material PLA.



FIGURA 12.6 PROTOTIPO N°4 TURBINA HIBRIDA DARRIEUS SAVONIUS.

12.5. Quinto Prototipo

Este prototipo es una versión distinta a las antes fabricadas, pero manteniendo la geométrica de mayor eficiencia hasta el momento, está diseñado con el centralizador para evitar pérdida de eficiencia, se mantienen las inclinaciones de mayor eficiencia analizadas, se inclina en 75° los Alabes Darrieus, pero en el sentido contrario a la inclinación del rotor Savonius, se contrastará la eficiencia respecto al cuarto prototipo. Se realizarán los ensayos correspondientes a ambos y se espera obtener resultados que aporten al desarrollo de mejoras significativas en la investigación.



FIGURA 12.7 PROTOTIPO N°5. CON SOPORTES DE EXTRUSIÓN PARA UN MEJOR ACABADO SUPERFICIAL

12.6. Sexto Prototipo

Luego de realizar ensayos en el túnel de viento a los prototipos anteriores y recopilar información suficiente para fortalecer las carencias presentadas hasta el momento. Se diseña un último prototipo de la turbina híbrida Darrieus Savonius, se utiliza la versión N°4 de la turbina como base y se realiza una modificación en la robustez del eje, se alargó y fortaleció el centralizador. Obteniendo una turbina capaz de soportar velocidades superiores a los 15 m/s en el túnel de viento.



FIGURA 12.8 PROTOTIPO VERSIÓN N°6.

12.7. Errores de fabricación

La fabricación del prototipo requiere tener conocimientos acerca de las limitaciones que tiene el proceso de extrusión en una impresora 3D. Partiendo por las dimensiones de fabricación las cuales limitaran el tamaño de los prototipos, otras características más específicas como la calidad superficial y la cantidad de soportes necesarios para la fabricación de una pieza, afectaran significativamente el acabo y calidad final del producto a fabricar.

A continuación, se muestran algunas imágenes de prototipos con fallas en su fabricación:



FIGURA 12.9 PROTOTIPO FABRICADO EN ABS CON DEMASIADO MATERIAL DE EXTRUSIÓN POR CAPA.



FIGURA 12.10 PROTOTIPO FABRICADO EN ABS EL CUAL FUE PULIDO PARA OBTENER UNA MEJOR CALIDAD SUPERFICIAL.



FIGURA 12.11 PROTOTIPO CON FALLA EN ALABE DARRIEUS, CARENCIA DE SOPORTES PARA DAR ESTABILIDAD AL ALABE HELICOIDAL.



FIGURA 12.12 PROTOTIPO 6 CALIDAD DE SUPERFICIE PROLIJA.

Se observa que se debe considerar una mínima cantidad de material a extruir por capa, desde el prototipo N°4 hasta el prototipo N°6, se fabricaron con la menor cantidad de material a extruir (0.2 mm) relleno de material 30-40 %. Obteniendo resultados satisfactorios en las pruebas del túnel de viento.

13. Ensayo en túnel de viento

Al realizar los ensayos en el túnel de viento, se busca obtener la mayor información posible del rendimiento del micro aerogenerador, es por este motivo que se diseñó un circuito eléctrico (Ver Figura 13.1) que utiliza el micromotor Mitsumi como fuente de poder, el circuito tiene un sensor de corriente y una pequeña ampolla, ambos en serie, un sensor de voltaje entre los nodos de la ampolla para cerrar el circuito. Utilizando los datos obtenidos de ambos sensores podemos obtener la potencia eléctrica generada por la turbina híbrida Darrieus Savonius.

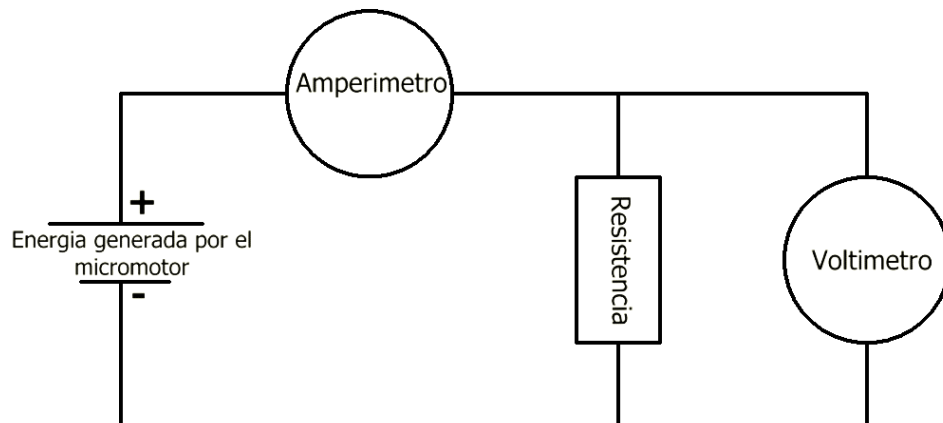


FIGURA 13.1 DIAGRAMA DEL CIRCUITO ELÉCTRICO UTILIZADO EN EL ENSAYO.

Se utiliza un anemómetro para medir el flujo de viento en la parte frontal del túnel de viento (Ver Figura 13.2). Esto nos permite obtener la potencia eléctrica en función de la velocidad de flujo, podemos conocer la velocidad de partida de la turbina Híbrida Darrieus Savonius, además de conocer la velocidad de viento en que la turbina opera con un mejor rendimiento.

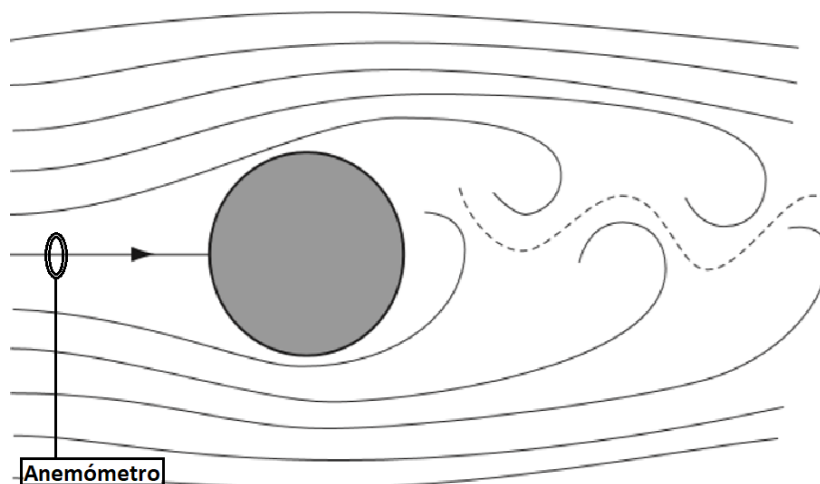


FIGURA 13.2 DISPOSICIÓN ANEMÓMETRO DENTRO DEL TÚNEL DE VIENTO.

Adicionalmente, para el ensayo del Prototipo N°6 (Figura 12.8) se utilizó un anemómetro en la parte posterior de la turbina híbrida. Con este anemómetro se puede obtener la diferencia de velocidades antes y después de que el flujo de viento pase por la turbina híbrida Darrieus Savonius.

13.1. Equipos de Medición

A continuación, se muestran los diferentes equipos utilizados para realizar las mediciones:

Multitester Hioki 3200: Se utilizaron dos de estos multitester uno en configuración para medir Voltaje [V], conectado en paralelo a una resistencia. Otro configurado para medir Intensidad de Corriente [mA], conectado en serie.

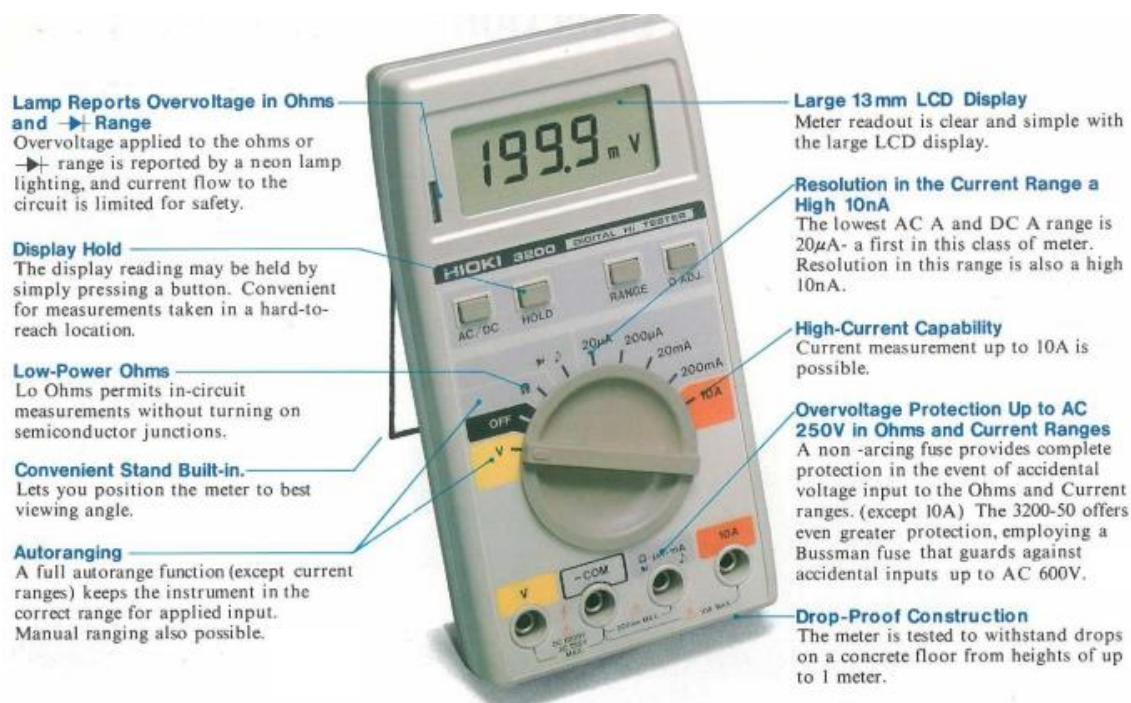


FIGURA 13.3 MULTI-TESTER DIGITAL HIOKI 3200 HI TESTER, RECUPERADO DE [HTTP://KUZYATECH.COM/WP-CONTENT/UPLOADS/2013/04/HIOKI_3200_11_12_22.PDF](http://kuzyatech.com/wp-content/uploads/2013/04/HIOKI_3200_11_12_22.PDF)

TABLA 13.1 RANGO DE MEDICIÓN Y PRECISIÓN RECUPERADA DE: [HTTP://KUZYATECH.COM/WP-CONTENT/UPLOADS/2013/04/HIOKI_3200_11_12_22.PDF](http://kuzyatech.com/wp-content/uploads/2013/04/HIOKI_3200_11_12_22.PDF)

Measurement Range and Accuracy (Specified for 23°C $\pm$ 5°C, <80% RH, after zero adjustment.)

	Range	Resolution	Accuracy	Notes		Range	Resolution	Accuracy	Notes	
D C V	200 mV	100μV	±0.35%rdg±1dgt.	Input resistance:>1000MΩ	O H M S	200 kΩ	100 Ω	±0.7%rdg±2dgt.	Open-terminal voltage:0.45V >	
	2 V	1 mV	±0.5 %rdg±1dgt.	" approx. 12MΩ		2000 kΩ	1kΩ	±1.0%rdg±2dgt.	"	
	20 V	10 mV	"	" approx. 11MΩ		20 MΩ	10kΩ	±2.0%rdg±2dgt.	"	
	200 V	0.1 V	"	" "		20 μA	10nA	±1.0%rdg±1dgt.	Int. resistance: approx. 10kΩ	
	1000 V	1 V	±1.0 %rdg±1dgt.	" "		200 μA	100nA	"	" 1kΩ	
A C V	2 V	1mV	±1.0 %rdg±4dgt. ±2.0 %rdg±4dgt.	" approx. Ω40Hz~500Hz " " 500Hz~1kHz	D C A	20 mA	10μA	"	" 10Ω	
	20 V	10mV	±1.0 %rdg±4dgt. ±2.0 %rdg±4dgt.	" approx.11MΩ 40Hz~1kHz " " 1kHz~5kHz		200 mA	100μA	"	" 1Ω	
	200 V	0.1 V	±1.0 %rdg±4dgt. ±2.0 %rdg±4dgt.	" " 40Hz~1kHz " " 1kHz~5kHz		10 A	10mA	±1.2%rdg±1dgt.	" <15mΩ	
	750 V	1 V	±1.0 %rdg±4dgt. ±2.0 %rdg±4dgt.	" " 40Hz~500Hz " " 500Hz~1kHz		20 μA	10 nA	±1.5%rdg±4dgt.	" approx. 10kΩ 40~500Hz	
						200 μA	100 nA	±1.2%rdg±4dgt.	" 1kΩ 40~1kHz	
O H M S	200 Ω	0.1 Ω	±0.7 %rdg±2dgt.	Open-terminal voltage:0.45V >	C A	20 mA	10μA	"	" 10Ω "	
	2 kΩ	1 Ω	"	" "		200 mA	100μA	"	" 1Ω "	
	20 kΩ	10 Ω	"	" "		10 A	10mA	±1.5%rdg±4dgt.	" <15mΩ 40~500Hz	
						Models:				
						Protected up to AC 250V; 3200, 3200-01(With carrying case)				
				Protected up to AC 600V; 3200-50, 3200-51 (With carrying case)						

TABLA 13.2 RANGO DE MEDICIÓN Y PRECISIÓN DE ANEMÓMETRO VELOCICALC 8386

Modelo	Velocidad del sensor termico (todos los modelos)
Distancia	0 a 50 m/s
Exactitud	$\pm 3.0\%$ de lectura o ± 0.015 m/s lo que sea mayor
Resolucion	0.01 m/s
Modelo	Velocidad desde un tubo de Pitot (modelo 8385 y 8386)
Distancia	1.27 a 78.7 m/s
Exactitud	1.5% a 10.16 m/s
Resolucion	0.01 m/s

Tablero Ensamble Didáctico Leybold: Para ensamblar circuitos de experimentos eléctricos y electrónicos para estudiantes y experimentos de entrenamiento. La superficie de experimentación tiene capacidad suficiente para circuitos de transistores con hasta tres etapas que consisten en pequeños elementos enchufables en formatos 2/19, 2/50 y 4/50.

También es adecuado para extender la base y los paneles de trabajo para los modelos de enseñanza de máquinas eléctricas.

- 24 rejillas de enchufe
- Frente equipado con intersecciones de 24 conductores y 120 enchufes
- Parte trasera equipada con 24 cuadrados conductores y 216 enchufes.
- Dimensiones: 30 cm x 20 cm x 2.4 cm

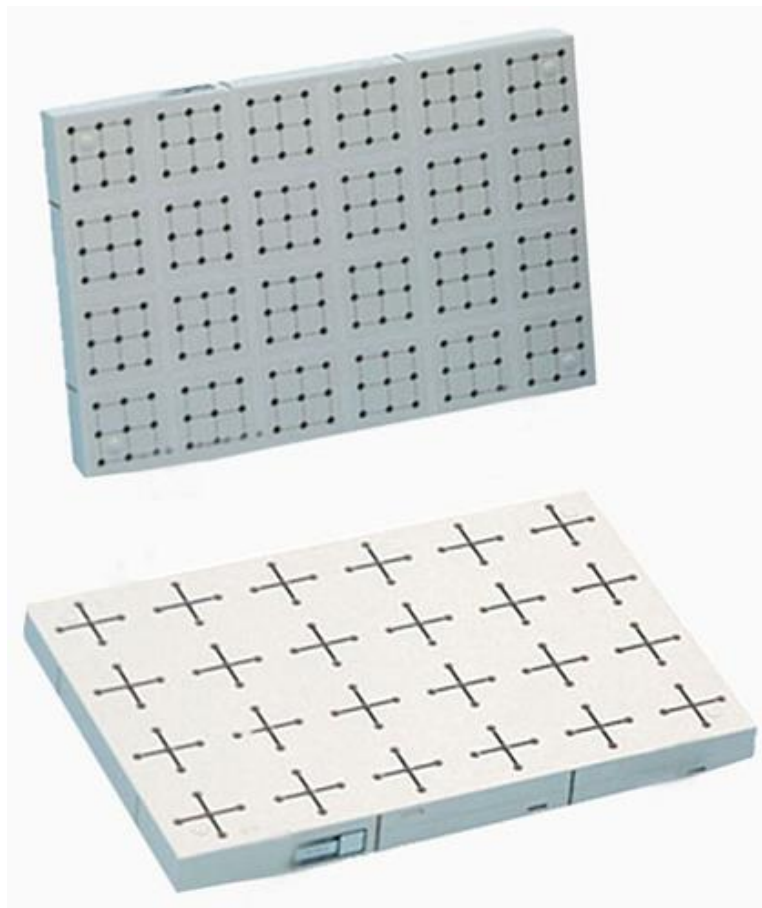


FIGURA 13.4 TABLERO ENSAMBLE CIRCUITOS ELÉCTRICOS LEYBOLD

Resistencias: Las resistencias utilizadas son ampolletas de 3.5 [Ohm] y 3.6 [Ohm] las cuales tienen terminaciones de anodo y catodo listas para conectar al Tablero de Ensamble Dicactico Leybold.



FIGURA 13.5 AMPOLLETAS UTILIZADAS COMO RESISTENCIAS EN EL CIRCUITO ELÉCTRICO.

Cables: Los cables de conexión de circuitos son de 4 mm. de diámetro, especialmente fabricados para conectarse de manera fácil y segura.



FIGURA 13.6 CABLES TABLERO LEYBOLD 4 MM.

Conector de pinza: Se utilizan dos de estos conectores para transferir la potencia desde el Micromotor Mitsumi al circuito eléctrico.

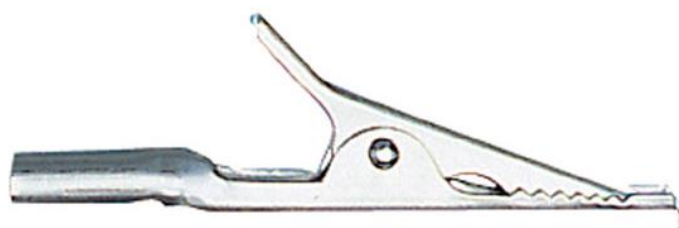


FIGURA 13.7 PINZAS DE COCODRILO PULIDAS CONEXIÓN 4 MM.

Medidor Velocicalc Plus: Los medidores VELOCICALC Plus de TSI miden y registran simultáneamente varios parámetros de ventilación utilizando una sola sonda con múltiples sensores. Miden la velocidad, la temperatura, la presión diferencial y la humedad. Calculan el caudal volumétrico. El Modelo 8386 también realiza cálculos de punto de rocío, temperatura de bulbo húmedo y flujo de calor.

Amplio rango de velocidad de 0 a 50 m / s

- La función de caudal hace cálculos simples del caudal volumétrico cuando el usuario ingresa la forma y el tamaño del conducto, el factor K o el tamaño de la bocina
- Las mediciones de velocidad se realizan desde el sensor térmico o un tubo de Pitot
- Conversión automática entre lecturas de velocidad real y estándar
- Cálculo directo del punto de rocío y la temperatura del bulbo húmedo: no se necesita una tabla psicrométrica (solo modelo 8386)
- La función de flujo de calor calcula el calor transferido después de un elemento de calentamiento o enfriamiento (modelo 8386 solamente)
- Pantalla digital estable al medir flujos fluctuantes
- La pantalla retroiluminada es fácil de leer en condiciones de poca luz
- Sonda telescópica de 101,6 cm con marcas de longitud grabadas para facilitar las mediciones de recorrido del conducto



FIGURA 13.8 MEDIDOR VELOCICALC MODELO 8386

13.2. Análisis Ensayos Realizados

Los prototipos N°1 y N°2 tuvieron problemas de resistencia antes de llevar a cabo la toma de datos, por este motivo las comparaciones cualitativas se empezaron a realizar a partir del tercer prototipo. Este prototipo fue fundamental para observar el diseño en funcionamiento dentro del túnel del viento, lo cual difiere de una simulación computacional, mostrando aspectos de diseño que se deben mejorar en los siguientes prototipos a ensayar.

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Termo fluidos de la Universidad Técnica Federico Santa María. Aunque los ensayos se realizaron en diferentes días, los parámetros de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica se mantuvieron con variaciones mínimas, por lo que se consideran como ensayos realizados bajo las mismas condiciones ambientales.

A continuación, se presenta la Tabla 13.1 la cual presenta los valores obtenidos de los ensayos realizados a los prototipos N°3, N°4 y N°5.

TABLA 13.1 DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DEL TÚNEL DE VIENTO PARA PROTOTIPOS N°3, N°4 Y N°5.

VIENTO [m/s]	Prototipo N°3			Prototipo N°4			Prototipo N°5		
	VOLTAJE [V]	INTENSIDAD [A]	POTENCIA [W]	VOLTAJE [V]	INTENSIDAD [A]	POTENCIA [W]	VOLTAJE [V]	INTENSIDAD [A]	POTENCIA [W]
4	0	0,1	0,00	0,52	0,3	0,16	0,46	0,5	0,23
5	0,7	0,4	0,28	0,91	0,5	0,46	0,86	0,5	0,43
6	0,9	0,5	0,45	1,04	0,5	0,52	0,99	0,5	0,50
7	1,22	0,7	0,85	1,3	0,7	0,91	1,26	0,7	0,88
8	2,03	0,7	1,42	2,16	0,7	1,51	2,0909	0,7	1,46
9	2,45	0,7	1,72	3,24	0,8	2,59	3,1363	0,8	2,51
10	2,65	0,8	2,12	5,76	0,8	4,61	5,5757	0,8	4,46
11	2,98	0,88	2,62	7,8	0,8	6,24	7,5504	0,8	6,04
12	3,06	0,88	2,69	8,58	0,8	6,86	8,3054	0,8	6,64
13	3,14	0,88	2,76	9,57	0,8	7,66	9,2638	0,8	7,41
14				11	0,8	8,80	10,648	0,8	8,52
15				13,2	0,8	10,56	12	0,8	9,60

Los parámetros ambientales al realizar los ensayos fueron los siguientes:

- Humedad relativa: 75-80 %
- Temperatura: 15°C
- Presión atmosférica: 1026 hPa

Cabe destacar que estos parámetros son un promedio entre los ensayos realizados, la temperatura es de 15°C ya que, al tratarse de un ensayo dentro de un túnel de viento, la temperatura a medida que se utiliza el túnel comienza a disminuir, alcanzando este valor, el cual se mantiene en el tiempo. La presión atmosférica por su parte no vario considerablemente durante la semana en la cual se llevaron a cabo los ensayos, al igual que la humedad relativa.

El túnel de viento permite realizar ensayos hasta una velocidad de 18 [m/s], por razones de seguridad de los prototipos los ensayos realizados alcanzaron una velocidad de 15 [m/s].

De la Tabla 13.1 se observa que la turbina N°4 es la que obtiene un mejor desempeño en función del viento.

Para una mejor visualización de los resultados se genera el Gráfico 13.1. en el cual se aprecia que el comportamiento de los prototipos N°4 y el prototipo N°5 son similares en cuanto a potencia generada.

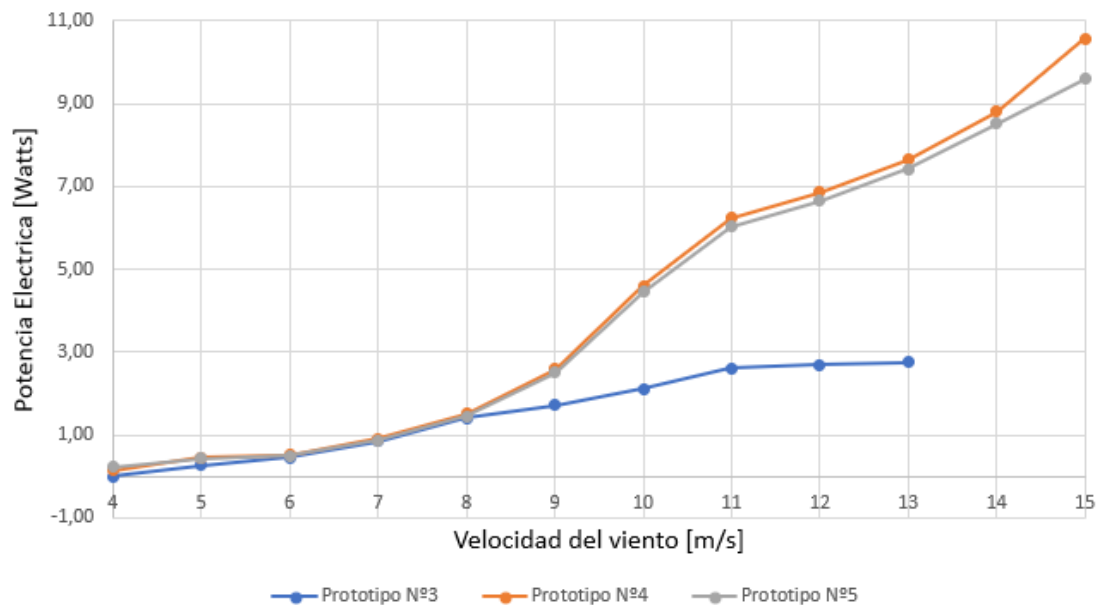


GRÁFICO 13.1 POTENCIA ELÉCTRICA GENERADA POR LOS DIFERENTES PROTOTIPOS DE LA TURBINA HÍBRIDA DARRIEUS SAVONIUS.

Los resultados obtenidos indican que la turbina híbrida Darrieus Savonius N°4 (Prototipo N°4), es la que genera mayor potencia eléctrica en función del viento, logrando generar una potencia eléctrica superior a 10 [Watts] (Ver Gráfico 13.1). El quinto prototipo (prototipo N°5) logra obtener una potencia similar, pero, a medida que aumenta la velocidad del viento se aprecia que el cuarto prototipo tiene un mejor comportamiento a mayor velocidad. Por su parte, el prototipo N°3 al no poseer un centralizador superior en su eje pierde estabilidad con el aumento de la velocidad del viento, provocando que la turbina híbrida vibre sobre su propio eje, disminuyendo significativamente la rotación del micromotor en función de la velocidad, lo cual se ve reflejado en que no es capaz de alcanzar una potencia eléctrica considerable.

La potencia eléctrica de los prototipos N°4 y N°5 demuestra una mejora considerable, debiéndose principalmente a fortalecer las carencias de los primeros prototipos, tales como, calidad superficial, estabilidad del eje al rotar, incorporación de un centralizador superior, robustez del eje, distanciamiento de alabes, entre otros.

Para obtener la eficiencia de la turbina N°4, es que se propusieron unas últimas mejoras al diseño. Se mejoró el diseño robusteciendo el eje, de 3mm a 5mm, la calidad superficial se dejó lo más prolija posible, se fortalecieron las uniones de los alabes Darrieus al alabe Savonius, se alargó el estabilizador del eje.

Se procedió a realizar el último ensayo en el túnel de viento al prototipo N°6, se dispuso un anemómetro en la entrada del volumen de control, y se dispuso un anemómetro lo más cercano a los alabes del aerogenerador, tras la salida del flujo de viento. Junto a esto, se dispuso el circuito eléctrico para medir la potencia eléctrica generada, utilizando el tablero y los componentes necesarios.

En el ensayo se utilizaron dos anemómetros para medir la velocidad de flujo en la entrada del volumen de control y a la salida de este. Con la diferencia entre ambas se calcula el coeficiente de potencia real, este se contrastará con el coeficiente teórico obteniendo la eficiencia de la turbina.

Se procede a calcular los parámetros necesarios para obtener la eficiencia.

Se calcula la energía teórica disponible a través del aerogenerador híbrido Darrieus Savonius:

- A nivel del mar y a 15°C, la densidad del aire es de 1.225 [kg/ m³]. Este es el valor de la ISA o Atmósfera Estándar Internacional [20].
- El área proyectada por las aspas de los rotores es 0.02 [m²] (Ver Figura 13.3).

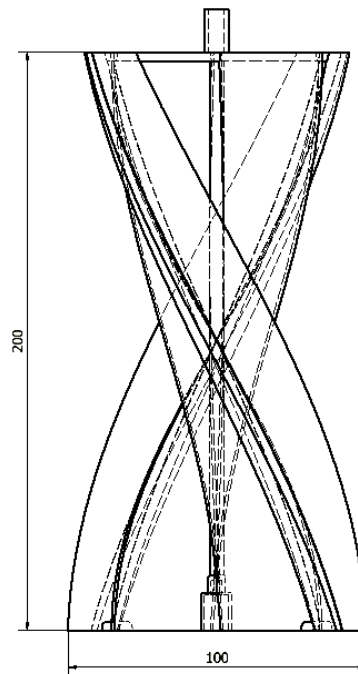


FIGURA 13.9 DIMENSIONES DEL PROTOTIPO A ENSAYAR.

De la ecuación (3.1) obtenemos la energía teórica disponible a través del viento,

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times AU^3 = \frac{1}{2} \times 1.225 \times 0.02 \times U^3 = 0.01225 \times U^3 \quad (13.1)$$

Obtenida la energía teórica en función del viento podemos obtener el coeficiente de potencia (ecuación 3.2).

A continuación, la potencia eléctrica obtenida del ensayo realizado en el túnel de viento al sexto prototipo y el coeficiente de potencia para cada velocidad de viento se registran en la Tabla 13.2.

TABLA 13.2 POTENCIA ELÉCTRICA GENERADA Y COEFICIENTE DE POTENCIA DEL PROTOTIPO N°6.

VIENTO [m/s]	VOLTAJE [V]	INTENSIDAD [mA]	POTENCIA [W]	CP
3	-			
4	2,04	102,1	0,208284	27%
5	3,28	132	0,43296	28%
6	4,93	158,4	0,780912	30%
7	6,18	220	1,3596	32%
8	7,07	305,6	2,160592	34%
9	7,9	408,4	3,22636	36%
10	8,76	596,8	5,227968	43%
11	9,43	770,8	7,268644	45%
12	10,11	823,6	8,326596	39%
13	10,96	836,9	9,172424	34%
14	11,4	880	10,032	30%
15	12,23	880	10,7624	26%

Se observa que la potencia eléctrica aumenta en forma creciente en función del viento, mientras que el coeficiente de potencia a los 11 [m/s] alcanza su mayor valor, es decir, la máxima eficiencia obtenida de la turbina híbrida Darrieus Savonius es de 45% (ver Gráfico 13.2).

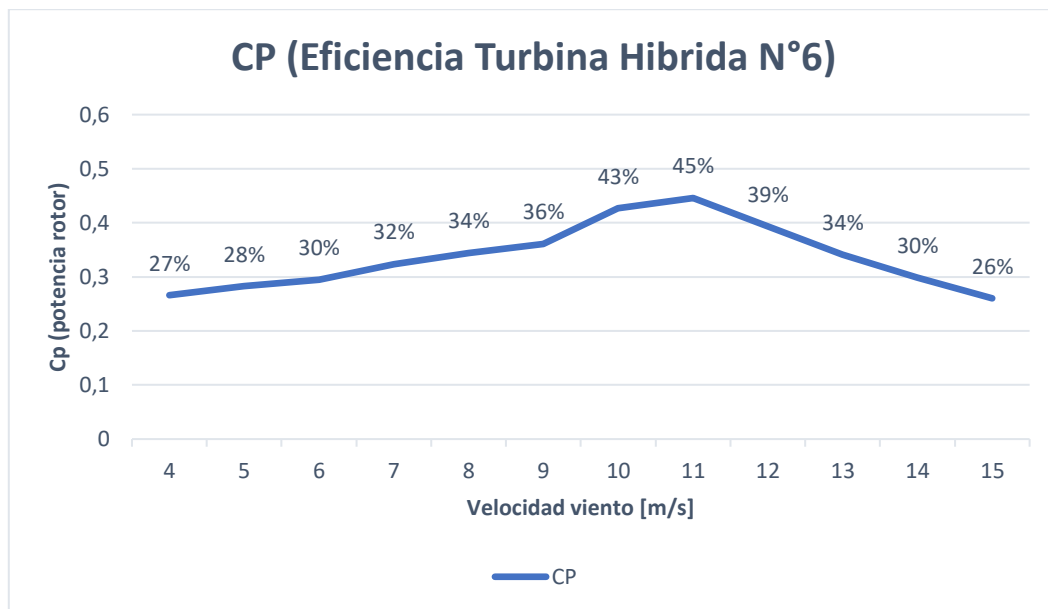


GRÁFICO 13.2 COEFICIENTE DE POTENCIA TURBINA HÍBRIDA DARRIEUS SAVONIUS N°6.

Sabemos que el coeficiente de potencia se puede relacionar con las velocidades a la entrada y salida del volumen de control en el túnel de viento (ecuación 3.23), Utilizando las ecuaciones descritas con anterioridad en el Capítulo 3, obtenemos los parámetros necesarios para expresar el coeficiente de potencia en función de las velocidades obtenidas en el volumen de control al interior del túnel de viento.

A continuación, se muestra la Tabla 13.3, la cual utiliza las diferentes velocidades al interior del túnel de viento para obtener el parámetro “a” y mediante la ecuación 3.23 nos entrega el coeficiente de potencia.

TABLA 13.3 COEFICIENTE DE POTENCIA EN FUNCIÓN DE LAS VELOCIDADES DE LOS ANEMÓMETROS EN EL ENSAYO DE LA TURBINA HÍBRIDA DARRIEUS SAVONIUS N°6.

Velocidad 1 anemómetro 1	Velocidad 2=3	Velocidad 4 anemómetro 2	a	CP(a)
[m/s]	[m/s]	[m/s]	[-]	[%]
7	6,60	3,10	0,0571	20%
8	7,50	3,50	0,0625	22%
9	8,20	3,70	0,0889	30%
10	8,90	3,90	0,1100	35%
11	9,70	4,20	0,1182	37%
12	10,80	4,80	0,1000	32%
13	11,70	5,20	0,1000	32%
14	12,75	5,75	0,0893	30%
15	13,80	6,30	0,0800	27%
16	14,70	6,70	0,0813	27%

Se aprecia que la mayor eficiencia obtenida mediante este método es de un 37% y se alcanza cuando el flujo de viento es de 11 [m/s]. Si bien, esta eficiencia es menor a la obtenida mediante el método que relaciona la potencia eléctrica con la potencia característica del rotor, ambos métodos alcanzan su mejor rendimiento a la misma velocidad del flujo de viento. Sin embargo, en la relación de las velocidades, estamos suponiendo flujo masico constante en el volumen de control asociado al área transversal de la turbina, entre otras consideraciones ideales que no son del todo precisas en el ensayo realizado.

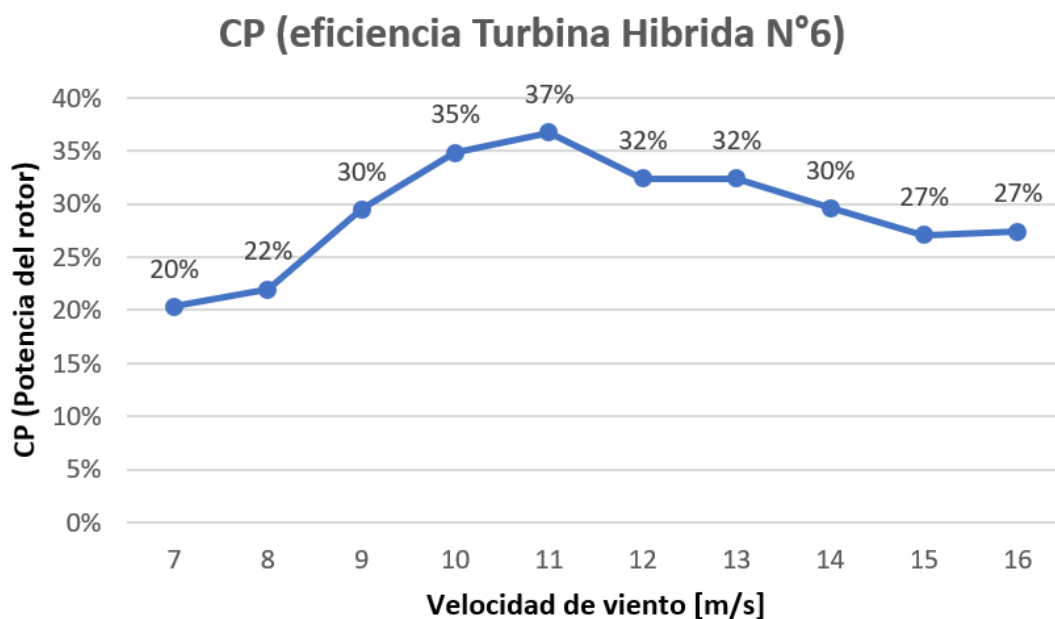


GRÁFICO 13.3 COEFICIENTE DE POTENCIA TURBINA HÍBRIDA DARRIEUS SAVONIUS N°6.

Finalmente, podemos recalcar que tanto el Grafico 13.2 como el Grafico 13.3, presentan una curva similar en función del viento, la cual, respalda los análisis realizados mediante el modelo computacional.

Las diferencias entre el prototipo computacional modelado en Ansys Workbench 9.1 y el prototipo fabricado en la impresora Multimaker 2+ son las presentadas en la siguiente Tabla:

TABLA 13.4 DIFERENCIAS MODELO COMPUTACIONAL VERSUS PROTOTIPO FABRICADO.

Prototipo simulado en Ansys Workbench 9.1	Prototipo fabricado en Multimaker 2+
Rotor Savonius diseñado en Chapa fluida.	Rotor Savonius de eje macizo para dar mayor estabilidad. Estabilizador en la parte superior del eje.
Sin acople al micromotor.	Se diseño acople para engranaje del micromotor en la base del eje.
Diámetro 300 mm.	Diámetro 100 mm.
Altura 600 mm.	Altura 200 mm.
Largo Cuerda 100 mm.	Largo Cuerda 33 mm.

14. Conclusiones

El trabajo de tesis presentado tuvo como principal motivación la fabricación de un rotor híbrido capaz de abarcar múltiples propósitos, para el cual mediante la recopilación de diversas patentes y artículos tecnológicos ayudaron a converger en un diseño que integra dos rotores de eje vertical, siendo específicamente los rotores Darrieus y Savonius los seleccionados, obteniendo un rotor tipo Gorlov al tener alabes helicoidales, se aprovecha los beneficios de ambos rotores helicoidales, el rotor Savonius helicoidal reduce el arrastre en contra del sentido giro a altas velocidades, y el rotor Darrieus helicoidal maximiza la sustentación.

Se estudiaron las características principales de cada diseño de aerogeneradores, considerando aquellas que tendrían un impacto positivo en la fabricación de nuestro prototipo. Logrando fabricar un prototipo capaz de interconectarse en un panel eólico, ser escalable y de fácil transporte. Se evitó el uso de transmisiones mecánicas entre rotor y generador, siendo esta transmisión directa, minimizando las pérdidas de conversión energética.

La eficiencia obtenida mediante la potencia eléctrica generada es de 45 % a una velocidad de 11 m/s.

La eficiencia obtenida mediante los valores de la velocidad del flujo de viento es de 37 % a una velocidad de 11 m/s. La cual es condicionada por errores de medición humana, ya que se debe tener en cuenta que el anemómetro no es capaz de obtener un valor exacto para la velocidad del flujo de viento después de que este pasa por la turbina híbrida, principalmente al no ser un volumen de control acotado solamente al área transversal de la turbina, no todo el flujo interactúa con el rotor. No cumpliendo ciertas consideraciones ideales.

Para realizar una correcta comparación entre distintos tipos de rotores, se utilizan los parámetros de coeficiente de potencia junto a la velocidad específica para generar gráficos que permitan discernir que rotor opera con un mejor desempeño aerodinámico respecto a los otros. Con respecto a los resultados obtenidos tanto para el rotor Darrieus, como para el rotor Savonius en su configuración tradicional, es decir, alabes de perfil recto en torno al eje central, estos mostraron una correcta correlación en base a los resultados experimentales históricos obtenidos para estos tipos de turbinas, siendo un parámetro de referencia el Gráfico 3.1 y diversos estudios consultados.

Se pudo comprobar que al agregar alabes al diseño de un rotor, este experimentaba un coeficiente de momento más constante en el tiempo, logrando evitar fluctuaciones al rotar, las cuales generan un impacto negativo en el rotor al desperdiciar energía en cada vibración producida. Si bien al incorporar una mayor cantidad de alabes se mejora la estabilidad del rotor, esto va en desmedro de la eficiencia que experimenta el rotor, donde al incorporar una mayor cantidad de alabes la eficiencia va disminuyendo paulatinamente, dado principalmente por el arrastre que genera este nuevo elemento en el diseño.

Para el rotor Savonius, se comprueba mediante el análisis computacional que presenta buenos resultados para velocidades específicas bajas, Si consideramos su principio de funcionamiento, el cual se basa principalmente en el arrastre que se genera en la cavidad del rotor, lo que nos permite generar una mayor cantidad de torque. Por otro lado, los rotores con alabes helicoidales

fueron los que obtuvieron el mejor desempeño aerodinámico, tomando como referencia al rotor Savonius de dos alabes, donde se pudo apreciar que el rotor de 90° tuvo los peores resultados obtenidos, mientras que al incorporar diseños con ángulos helicoidales el rendimiento aumentó en un 10%.

El rotor Darrieus presentó mejores resultados a velocidades específicas superiores, siendo motivo principal el hecho de tener como principio de funcionamiento la sustentación. A diferencia del rotor Savonius, en este caso la incorporación de rotores helicoidales no tuvo un mayor impacto en la eficiencia del rotor, si bien existe un aumento este no es tan considerable como lo fue para el rotor Savonius.

Para la integración del rotor se optó por graficar la eficiencia en función del ángulo de rotación, la cual fue una buena herramienta para elegir el mejor ángulo en el cual se integrarían los dos rotores, todo esto para evitar traslapes de funcionamiento y con esto mejorar la eficiencia global de la turbina híbrida propuesta. Por otro lado, también se tuvo consideración en que la distancia entre los dos rotores si podía ser un factor que considerar, ya que como se comprobó computacionalmente, al tener los rotores con una baja separación esto imposibilita que el flujo impacte en toda la extensión de los alabes del rotor a integrar, comportándose como un cilindro macizo a velocidades del flujo de viento altas.

Para la fabricación de prototipos de turbinas híbridas en impresoras 3D, se debe tener un amplio conocimiento sobre estas, ya que hay ciertas limitaciones de diseño que no son apreciables en los modelos computacionales. Se debió incluir un eje central al rotor, el cual en los modelos computacionales no está considerado, lo que ayudaba a suavizar la interacción del fluido con los alabes. Se añadieron conectores para unir el rotor Darrieus al rotor central Savonius. Una de las últimas modificaciones que se incluyó fue un centralizador en la parte superior del rotor, el cual evita de manera significativa las fluctuaciones del rotor mientras opera, mejorando el desempeño considerablemente.

En la realización de los ensayos en el túnel de viento se comprueba que la turbina puede operar a bajas velocidades, alcanzando su punto de partida a los 4 [m/s]. Se obtienen datos valiosos en cuanto a generación de potencia eléctrica y desempeño. El funcionamiento de la Turbina Híbrida Darrieus Savonius en los primeros ensayos permitió encontrar algunas carencias de diseño permitiendo generar una mejora continua para la fabricación de los siguientes prototipos.

La potencia generada por la Turbina Híbrida Darrieus Savonius depende de factores como el diseño del rotor, ángulo de ataque de los alabes, material de fabricación, micromotor utilizado para la conversión, entre otros. Dentro de los factores mencionados, la selección del micromotor a utilizar es una de las elecciones de mayor importancia, ya que será este el encargado de convertir la energía cinética generada por los rotores en energía eléctrica. Se recomienda invertir en un micromotor de calidad, para tener la menor pérdida en la conversión de energía.

Referencias

- [1] Ricardo Sanzana, "Diseño, fabricación y prueba de un microaerogenerador híbrido multipropósito" Sept. 2017.
- [2] M. C. Enzo Cortesi, "Hybrid type vertical shaft turbine for wind power generating devices," July 7 2010. US Patent US12844995.
- [3] V. Kane, "Wind turbine," Feb. 3 2004. US Patent US7040859B2.
- [4] W. D. B, "Novel turbine and blades," July 29 2010. US Patent US20110027084A1.
- [5] W. S. Becker, "Wind turbine device," July 29 2003. US Patent US7132760B2.
- [6] D. W. R. Gary D. Roberts, "Aerodynamic-hybrid vertical-axis wind turbine," June 3 2005. US Patent US7329965B2.
- [7] H. L. A. Pertti H. Naskali, Angus MacLean Neil, "Helical wind turbine," May 13 2005. US Patent US7344353B2.
- [8] J. Hart, "Helical taper induced vortical flow turbine," May 05 2006. US Patent US20070258806A1
- [9] M. Petitgenet, A. Rahmani, "Éolienne a axe vertical", October 22 2009. EP Patent EP2337951A2.
- [10] A. A. Indra Herlamba Siregar, "Performance of combined vertical axis wind turbine blade between airfoil naca 0018 with curve blade with and without guide vane," 2016.
- [11] Oscar Orduz, Julian Suarez, "Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación de baja potencia", 2011.
- [12] W. Abid, Karimov, "Design, development and testing of a combined savonius and darrieus vertical axis wind turbine," 2015.
- [13] Kumarappa, "Design and fabrication of vertical wind turbine for power generation at highway medians," 2012.

-
- [14] Siddiqui A., Memon A. H., Mian S. N., Khatoon R., Kamran M., Shaikh H., «Experimental Investigations of Hybrid Vertical Axis Wind» International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development (4°, 2016, Pakistan) Mehran University of Engineering and Technology. 7 p.
- [15] Windside Vertical Axis Wind Turbines, Finland-based Oy Windside Production Ltd.
- [16] verticale as turbine van Noveol, Noveol specifications, Nov'Turbine, 2009.
- [17] Juan Manuel Tejero Alonso, aerogenerador vertical urbano, Julio 2011.
- [18] VENTCAT, "características Darrieus". (s.f.). [En línea]. Disponible en: https://joanproject.weebly.com/uploads/1/9/8/4/19845941/30_pdfsam_ventcat.pdf
- [19] FILAMENTO PARA IMPRESORAS 3D: TIPOS Y CARACTERÍSTICAS, [En línea]. Disponible en: <http://impresorad3d.com/filamento-para-impresoras-3d-tipos/>
- [20] Ultimaker 2+, especificaciones técnicas de la impresora 3D.
- [21] Turbina Savonius "Gorlov VAWT 3D Print Models" [En línea]. Disponible en: <https://cgtrader.com/3d-print-models/hobby-diy/mechanical-parts/savonius-gorlov-vawt>
- [22] "Modelo de turbina eólica de eje vertical (VAWT) impreso en 3D" [En línea]. Disponible en: <https://ultimaker.com/es/learn/3d-printed-vertical-axis-wind-turbine-vawt-model>
- [23] Roberts D. W., Roberts G. D., «Aerodynamic-hybrid vertical-axis wind turbine». US7329965B2 (US 11/145,523), 07 Junio 2008. 33 p.
- [24] ISA - International Standard Atmosphere.rtf