



# Simulación de rotores tipo savonius adaptando en sus alabes un perfil NACA

**Daniela Andrea Vega Beleño**  
**Brayan Daniel Pereira Guerrero**

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Barranquilla, Colombia  
2020



# **Simulación de rotores tipo savonius adaptando en sus alabes un perfil NACA**

**Daniela Andrea Vega Beleño  
Brayan Daniel Pereira Guerrero**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingenieros Mecánicos**

Director (a):

Msc. Jonathan Fábregas

Codirector (a):

PhD. Argemiro Palencia.

Línea de Investigación:

Eficiencia Energética.

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Barranquilla, Colombia

2020



*Doy gracias a Dios por permitirme llegar a este punto de mi carrera profesional. Agradezco a mi madre quien siempre busco un medio para poder continuar, a mi Lialla por creer en mí, a mi tía Maira por su ayuda desinteresada y Rosemary por su voto de confianza, gracias por ser parte de este gran sueño.*

*Daniela Andrea Vega Beleño*

*A mis dos grandes tesoros. Mi tía preciosa que me cuida desde el cielo y mi mamagrande aquí en la tierra, a mi tío Jair por todo el apoyo en este largo proceso como ingeniero y a mi familia entera por todo el amor. A ellos les debo todo.*

*Brayan Daniel Pereira Guerrero*



## **Agradecimientos**

Primeramente, a Dios por permitirnos llegar hasta este punto de nuestra formación profesional como ingenieros mecánicos.

Agradecemos de manera especial y sincera al ingeniero Jonathan Fábregas por colocar a disposición su conocimiento y experticia en la elaboración del presente proyecto de grado, Debemos destacar su disponibilidad y paciencia, su apoyo y direccionamiento que ha sido un aporte invaluable no solo en el desarrollo de nuestro trabajo de grado sino también en nuestra formación como profesional.

Queremos expresar también nuestro más sincero agradecimiento a todos los profesores de la UAN sede Puerto Colombia por compartir su experiencia y conocimiento, su colaboración fue de gran ayuda durante nuestra instancia universitaria.



## Resumen

Existen 3 principales tipos de aerogeneradores, su diferencia radica principalmente en su tipo de rotor, la dirección de su eje y la forma de sus alabes. Para los aerogeneradores de eje vertical se encuentra los Darrieus, Giromill y Savonius.

El presente proyecto, que tiene como finalidad la simulación del rotor tipo savonius adaptando en sus alabes un perfil NACA. Para la ejecución del mismo se contará con un software de diseño CAD llamado SolidWorks® en el cual se delinearán y se generará la geometría del perfil NACA seleccionado para ser usado en el rotor savonius, luego de esto y con la ayuda de simulación CFD (Computational Fluid Dynamics) en el software ANSYS se evalúa el coeficiente de desempeño del mismo. Se obtuvieron resultados de la comparación del comportamiento de cada rotor según su potencia generada, coeficiente de desempeño y velocidades alcanzadas, mostrando que la adaptación de un perfil aerodinámico mejora el comportamiento del rotor conforme se incrementa la velocidad del viento.

**Palabras clave: (Rotor, Savonius, Alabe, NACA, CFD)**

## **Abstract**

There are 3 main types of wind turbines, their difference lies mainly in their type of rotor, the direction of their axis, and the shape of their blades. For vertical axis, wind turbines are the Darrieus, Giromill, and Savonius.

The present project, which aims to simulate the savonius rotor by adapting a NACA profile on its blades. For its execution there will be a CAD design software called SolidWorks® in which the geometry of the selected NACA profile will be outlined and generated to be used in the savonius rotor, after this and with the help of CFD simulation (Fluid Computational Dynamics) in the ANSYS software, its power coefficient is evaluated. Results were obtained from the comparison of the behavior of each rotor according to its power generated, power coefficient and speeds reached, showing that the adaptation of an aerodynamic profile improves the behavior of the rotor as the wind speed increases.

**Keywords: (Rotor, Savonius, Blade, NACA, CFD)**

# Contenido

Pág.

<b>Resumen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUCCION Y ANTECEDENTES</b> .....	<b>17</b>
1.1 Planteamiento del problema .....	20
1.1.1 Objetivos.....	21
1.1.2 Objetivo generales .....	21
1.1.3 Objetivos específicos .....	21
<b>2. FUNDAMENTOS</b> .....	<b>23</b>
2.1 Energía eólica .....	23
2.2 Límite de betz.....	23
2.3 Rotor savonius .....	27
2.4 Diseño de un rotor savonius .....	28
2.4.1 Rendimiento de los rotores savonius.....	28
2.5 Parámetros influyentes en el rendimiento de rotores tipo savonius. ....	29
2.5.1 Número de palas.....	29
2.5.2 Relación de superposición .....	30
2.5.3 Relación de aspecto.....	30
2.6 Perfil alar .....	31
2.7 Geometría del perfil alar.....	32
2.8 Perfil NACA .....	33
2.8.1 Serie NACA 4 dígitos .....	33
2.9 Fluidodinámica computacional CFD .....	34
2.9.1 Ecuación del movimiento de cuerpo rígido.....	35
2.9.2 Ecuación rotacional del movimiento .....	36
2.9.3 Modelos de turbulencia.....	36
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	<b>39</b>
3.1 Identificación de perfil aerodinámico .....	39
3.2 Configuración de la geometría del rotor Savonius .....	39
3.3 Métodos de cálculo para el coeficiente de potencia de rotores Savonius .....	39
3.4 Desarrollo del modelado CAD .....	40
3.5 Simulación por medio de software CFD .....	40
3.6 Evaluación de resultados.....	40
3.7 Selección del perfil NACA.....	41

---

3.8	Modelado CAD .....	41
3.8.1	Esquema y tabla rotor savonius convencional .....	42
3.8.2	Esquema y tabla rotor savonius con alabe naca 6506 .....	43
3.8.3	Esquema y tabla rotor savonius con perfil NACA adaptado .....	44
3.9	Simulación por fluidodinámica computacional. ....	45
3.10	Mallado de geometría. ....	45
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>49</b>
4.1	Representación gráfica de la velocidad angular de rotores (N1, N2, N3) .....	53
4.2	Representación gráfica del torque para los rotores (N1, N2, N3).....	56
4.3	Representación gráfica de potencia para los rotores (N1, N2, N3) .....	58
4.4	Coefficiente de potencia Cp y TSR para los rotores (N1, N2, N3).....	61
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b> .....	<b>67</b>
5.1	Conclusiones .....	67
	<b>Bibliografía</b> .....	<b>69</b>

## Lista de figuras

Figura 1. Esquema de paso del viento a través del aerogenerador (De Lellis et al., 2018)	24
Figura 2. El eje horizontal refleja la relación $v_2/v_1$ el eje vertical es el “coeficiente de potencia” (Cárdenas, 2015).	26
Figura 3. Descripción del funcionamiento de un rotor savonius (Hidalgo et al., 2018)	27
Figura 4. Alternativas de diseño rotor savonius (Kothe et al., 2020)	28
Figura 5. Relación de superposición en rotores savonius (Saad et al., 2020).	30
Figura 6. Angulo de ataque con respecto a la dirección del viento (Harpe et al., 2015)	31
Figura 7: Geometría del perfil alar (Harpe et al., 2015)	32
Figura 8. Representación de perfil naca 6506 (Harpe et al., 2015)	34
Figura 9. Familia NACA 4 dígitos (Harpe et al., 2015)	41
Figura 10. Geometría del rotor savonius convencional	42
Figura 11. Rotor savonius con alabe naca 6506	43
Figura 12. Rotor Savonius con perfil naca adaptado	44
Figura 13: Mallado volumétrico sección transversal - Vista superior	45
Figura 14: Mallado de turbina	46
Figura 15: Calidad del mallado.	46
Figura 16: Estadísticas del mallado.	46
Figura 17: Condiciones de frontera.	47
Figura 18. Rotor savonius convencional velocidad 5 m/s	49
Figura 19. Representación vectorial del rotor savonius a 5m/s	50
Figura 20. Esquema de presión del rotor savonius convencional	50
Figura 21. Rotor savonius convencional con alabe naca 6505 velocidad 5 m/s	51
Figura 22. Representación vectorial del rotor savonius con alabe naca 6505 a 5m/s	51
Figura 23. Esquema de presión del rotor savonius con alabe naca 6505	52
Figura 24. Rotor savonius convencional con alabe naca adaptado velocidad 5 m/s	52
Figura 25. Representación vectorial del rotor savonius con alabe naca adaptado a 5m/s	53
Figura 26. Zona de contacto y zona de vacío rotor savonius con alabe naca adaptado	53
Figura 27: Velocidad angular - tiempo (N1)	54
Figura 28: Velocidad angular - tiempo (N2)	54
Figura 29: Velocidad angular - tiempo ( N3)	55
Figura 30: Velocidad angular - tiempo (N1 - N2 -N3)	56
Figura 31: Torque - Tiempo (N1)	56
Figura 32. Torque - Tiempo (N2)	57
Figura 33. Torque - Tiempo (N3)	58
Figura 34: Torque - Tiempo (N1 - N2 - N3)	58

---

Figura 35: Potencia - Tiempo ( N1).....	59
Figura 36: Potencia - Tiempo (N2).....	59
Figura 37: Potencia - Tiempo (N3).....	60
Figura 38: Potencia - Tiempo (N1 - N2- N3).....	60
Figura 39. Rotor savonius con área de ataque.....	62
Figura 40. Potencia – velocidad del viento .....	63
Figura 41. TSR – Cp N1.....	63
Figura 42. TSR – Cp N2.....	63
Figura 43. TSR – Cp N3.....	64
Figura 44. Cp - TSR (N1 - N2 - N3) .....	64
Figura 45. Cm - TSR (N1 - N2 - N3) .....	65

## Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Descripción serie naca 4 dígitos, perfil 6506 (Paz, 2013).....	34
Tabla 2. Propiedades material ABS utilizado para ambos rotores.....	41
Tabla 3. Propiedades del rotor savonius sin alabe naca.....	42
Tabla 4. Propiedades rotor savonius con alabe naca 6506 .....	43
Tabla 5. Propiedades savonius con alabe naca adaptado.....	44



# 1.INTRODUCCION Y ANTECEDENTES

Por motivo del aumento poblacional y del consumo de energía eléctrica, crece la necesidad de explorar fuentes alternativas a los combustibles fósiles para reducir a su mínima expresión el uso de recursos - No Renovables, en el mundo las fuentes de energía eléctrica están vinculadas directamente al carbón, petróleo y gas natural. Este tipo de fuentes se acaban en algún momento, lo opuesto a las fuentes de energía renovables. Estas ofrecen gran sustentabilidad debido a que restablecen constantemente su energía, la cual proviene en su mayoría del sol y del viento.

En la actualidad la energía eólica participa activa y poderosamente como fuente de generación de energía eléctrica por su costo accesible y la baja emisión de gases de efecto invernadero. La energía es obtenida de la fuerza del viento que es impulsada por aerogeneradores cuya función es convertir la energía cinética del viento en energía mecánica.

Las turbinas eólicas son clasificadas conforme al sentido de su eje de rotación, donde figuran: las turbinas eólicas de eje horizontal (HAWT) y las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT).

HAWT: Comúnmente son utilizadas para la producción de energía y se caracterizan por su elevado coeficiente de potencia.

VAWT: Este tipo de turbinas eólicas se caracterizan por girar a bajas revoluciones y no tienen en cuenta la orientación del viento para entrar en funcionamiento, siendo motivo de gran interés e investigación, los rotores savonius se encuentran dentro de este tipo de turbina y la gran característica es su diseño simple compuesto por dos palas conocidos por operar a bajas velocidades.

La sencillez de su fabricación y el bajo costo de mantenimiento y operación de este tipo de rotores se considera una alta ventaja y sustentabilidad. No obstante, su baja eficiencia y desempeño ha sido motivo de diversas investigaciones que buscan mejorar su funcionamiento y utilidad.

Esta idea nace de la necesidad de muchas vías intermunicipales en donde actualmente existen diversas afectaciones por fallas en el servicio de energía eléctrica. Este trabajo está dirigido a los territorios donde se carece de iluminación adecuada para la dinámica pública y cotidiana: como el transporte. Al analizar el modo de abastecer distintos sistemas eléctricos de bajo consumo, la energía eólica es idónea porque simplemente es obtenida del viento: que es la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire y se transforma en formas útiles de energía para uso y beneficio del ser humano y de su entorno. Colombia es reconocida en el mundo por poseer una matriz de generación de energía de alta limpieza y calidad.

Los recursos hídricos son la fuente de energía más relevante del país, pero se han contemplado nuevas alternativas con propósito de diversificar la matriz energética con fuentes de generación no convencional.

El Gobierno de Colombia se halla en la tarea de adoptar una política de transición energética, referida a la sustitución de combustibles fósiles por energías renovables con el objetivo de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Emplear dispositivos como turbinas eólicas es una manera de hacer uso óptimo y razonable de la energía. Concepto apoyado por investigaciones como las realizadas por C.M. Chan et al. [1] en el que estudia la optimización de la forma del alabe de la Turbina Eólica Savonius para mejorar su coeficiente de potencia, donde se utiliza herramientas computacionales para evaluar el comportamiento.

En los resultados se compara la turbina eólica con las cuchillas semicirculares, y se consigue una mejora significativa del 33% en el promedio de coeficiente de potencia. Lo cual sugiere que la turbina eólica savonius con palas óptimas tiene gran potencial para ser aplicado en el entorno urbano real. Deepak Divashkar et al. [2] analizaron el rendimiento de un rotor Savonius de 1,8 m de diámetro en inmersión. El rotor savonius obtuvo el mejor

rendimiento a una profundidad de inmersión de 1, 0 D en comparación a mayores profundidades. La potencia producida por el rotor disminuyó en un 37% a 1.25 D en comparación con 1.0 D. Además, el ángulo de entrada de la cuchilla también afectó el rendimiento del Rotor. La potencia y eficiencia máximas en el estado medio del mar fueron 15.01 kW y 16.7% respectivamente. Zemamou M. et al. [3] Revisaron los trabajos relacionados con el uso de Rotores Savonius como fuente alternativa de generación de energías limpias, donde analizan los resultados de las investigaciones y concluyen que la implementación de rotores savonius es una alternativa aceptable y capaz de generar energía.

De lo mencionado se realiza el estudio del coeficiente desempeño de un rotor tipo savonius al usar en su geometría del alabe un perfil NACA apropiado a su configuración geométrica, comparado a su forma de alabe tradicional evaluando la eficiencia lograda por ambos modelos y permitiendo concluir con la mejor opción de diseño.

En (saad et al., 2020) se estudia la configuración del rotor savonius de palas torcidas, teniendo en cuenta la configuración geométrica y su influencia en el rendimiento aerodinámico del rotor retorcido savonius. El aumento del coeficiente de potencia a 6 m/s alcanza su valor más alto y el aumento de superposición por encima de cero genera remolinos que causan pérdidas significativas de energía cinética.

Por su parte (kothe et al., 2020) su estudio compara el modelo del rotor savonius helicoidal con cuchillas retorcidas 180° con un modelo de turbina savonius de dos etapas. Numérica y experimentalmente demostraron que ambos modelos tienen un comportamiento similar, la turbina helicoidal presenta mejor rendimiento ya que el  $c_p$  fue 9,4% más alto que el obtenido en turbina de dos etapas.

## 1.1 Planteamiento del problema

En vías intermunicipales como la autopista Barranquilla–Puerto Colombia, la iluminación vial ha sido objeto de análisis a causa del alto costo por instalación de postes y extensión del cableado para satisfacer la necesidad de fluido eléctrico en cada punto de la misma.

Un problema a resolver es el espacio entre los alumbrados que permiten zonas oscuras y peligrosas. La intención de este proyecto es aprovechar la tecnología amigable con el ambiente y utilizar como recurso energético el potencial del viento que es solución posible para romper la dependencia a los combustibles fósiles y a las hidroeléctricas, cuya consecuencia a través del tiempo resulta en grave deterioro y destrucción a la naturaleza y medio ambiente.

A estos beneficios se añade la reducción y el ahorro de recursos como los cableados que transportan a largas distancias la electricidad (cuando se trata de vías intermunicipales).

Un tema a destacar es respecto a las metas del Gobierno, que junto al Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD, definen 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para impulsar y respaldar proyectos en miras de la sostenibilidad global y eliminación de la pobreza en el país.

El objetivo número 7 especifica: “energía asequible y no contaminantes” por lo que implementar energías renovables como la Eólica, es un avance indispensable para lograr las metas propuestas.

Los rotores savonius son turbinas eólicas de eje vertical, utilizadas en alturas donde la velocidad del viento es relativamente baja; pero de alta practicidad cuando funcionan dentro de zonas urbanizadas, donde su diseño se desarrolla de acuerdo a la característica energética y medioambiental según el lugar donde se implemente.

Por tanto, se debe iniciar un estudio para evaluar el comportamiento de un rotor savonius en que varíe su geometría de Alabe, utilizando un perfil NACA, y comparándolo con su forma de alabe tradicional, mediante simulaciones y un Software especializado que permita establecer el coeficiente de desempeño, desarrollo de los diseños y el grado de eficiencia para optar según la mejor propuesta y pueda ser perfeccionada en investigaciones posteriores.

### **1.1.1 Objetivos**

En el marco de la eficiencia energética y del buen uso de la misma, se decide trabajar con este tipo de rotores debido a la simplicidad del mismo, además de esto resulta mucho más viable y económico trabajar con rotores savonius para abastecer dicha necesidad ya que la forma convencional de transformación de energía eléctrica representa un costo elevado. Además, con la implementación del perfil NACA se buscará evaluar la eficiencia con respecto a un perfil de alabe tradicional lo cual puede dar como resultado a una posterior fabricación y puesta en marcha. Los rotores savonius al ser turbinas de eje vertical pueden trabajar con velocidades de viento proveniente de cualquier dirección y con la ventaja de operar a bajas velocidades

### **1.1.2 Objetivo generales**

- Simular un rotor tipo savonius adaptando en sus alabes un perfil NACA.

### **1.1.3 Objetivos específicos**

- Identificar el perfil NACA apto para usar en un rotor tipo savonius.
- Seleccionar el tipo de rotor savonius para la generación de geometría CAD en software de diseño SolidWorks® con el perfil seleccionado.
- Evaluar el coeficiente de desempeño de un rotor savonius con perfil NACA adaptado con respecto a la geometría convencional a través de software CFD



## 2.FUNDAMENTOS

### 2.1 Energía eólica

La energía eólica es una fuente de generación de electricidad trascendental para un cambio de modelo energético más limpio y sostenible, este tipo de energía se genera gracias a la transformación de la energía cinética producidas por las corrientes de aire, la cual es transformada en energía mecánica a través de aerogeneradores.

En los últimos años la energía eólica ha confirmado su viabilidad técnica y económica. Los progresos significativos en los aspectos técnicos y económicos conllevan al mejoramiento notorio de la gestión y mantenimiento de parques eólicos, la integración de energía eléctrica en la red, versatilidad y adaptación de diseños de los aerogeneradores. (López et al., 2012)

La energía eólica en el mundo ha tenido un crecimiento exponencial, la capacidad instalada en 2019 fue de más de 60GW, siendo el segundo año más grande de la historia

### 2.2 Límite de betz

En el estudio de la eficiencia de energía eólica la ley de betz es de suma importancia, por lo tanto, se define:

La potencia de la masa de aire que atraviesa una energía eólica, es decir la energía cinética por unidad de tiempo, se encuentra definida por:

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

$\rho$  = Densidad

$A$  = Area descrita por el aerogenerador

$v^3$  = Velocidad del viento

Cuanto mayor es la energía cinética del viento extruida por el aerogenerador, mayor será el frenado que sufre el viento que deja el aerogenerador.

La idea de la presentación de la ley de betz es llegar a la conclusión del porque se obtiene un valor límite para la potencia que el viento puede entregar a través de un aerogenerador.

Entre un extremo y otro del aerogenerador existe un punto medio y este es el valor más eficiente de la conversión de energía que teóricamente se puede alcanzar.

En 1919 el físico alemán Albert betz obtuvo este valor por medio de una formulación denominada límite o ley de betz.

Suponga que se tiene el viento que entra por la turbina con una velocidad  $v_1$  y cuando el viento abandona la turbina lo hace con una velocidad  $v_2$ , por lo tanto se tendrían dos energías cinéticas una antes de atravesar la turbina y la otra cuando ya atravesó el aerogenerador.



Figura 1. Esquema de paso del viento a través del aerogenerador (De Lellis et al., 2018)

$$E_{C1} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 \quad (2)$$

$$E_{C2} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2 \quad (3)$$

Por lo tanto, la energía cinética que se ha transferido al aerogenerador será la diferencia de las dos energías cinéticas la que entro menos la que ingreso y viene dada por la siguiente ecuación

$$E_{CT} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (4)$$

Se define el caudal del aire que incide sobre las palas del aerogenerador como:

$$Q = v \cdot A \quad (5)$$

Si se multiplica ambos miembros de la expresión anterior por la densidad se obtendría.

$$\rho \cdot Q = v \cdot A \cdot \rho = m' \quad (6)$$

$m' = \text{masa por unidad de tiempo ( masa de aire que incide en las palas cada segundo)}$

Si se sustituye el valor anterior en la expresión (3)

$$P = \frac{1}{2} \cdot m' \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (7)$$

Se asume una velocidad media dado por la siguiente expresión.

$$v = \frac{(v_1 - v_2)}{2} \quad (8)$$

Remplazando (8) en (6)

$$m' = \rho \cdot \frac{(v_1 - v_2)}{2} \cdot A \quad (9)$$

Luego se remplaza (9) en (7)

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) \cdot A \quad (10)$$

Entonces se tiene lo siguiente.

$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (\text{Potencia de incidencia}) \quad (11)$$

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) \cdot A \quad (\text{Potencia generada}) \quad (12)$$

Si se combinan estas dos potencias en una división, se obtiene la relación entre la potencia generada en el aerogenerador y la potencia de incidencia del aire.

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right\} \left\{ 1 + \left( \frac{v_2}{v_1} \right) \right\} \quad (13)$$

La representación gráfica de la función para cualquier valor de  $v_1$ ,  $v_2$  y para cualquier valor de

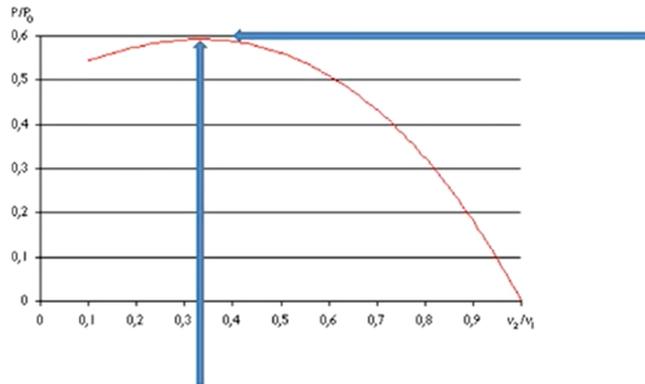


Figura 2. El eje horizontal refleja la relación  $v_2/v_1$  el eje vertical es el “coeficiente de potencia” (Cárdenas, 2015)

Se nota en la gráfica que el máximo de la función se obtiene entorno de 0.33 y que tiene un valor determinado de  $0.59 = \frac{16}{27} = C_p$  *Límite de Betz*

El límite de betz permite replantear en función de la velocidad, de la densidad del aire y del área que definen las aspas la expresión de la potencia que puede ser generada por una turbina eólica.

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (\text{Potencia generada por una turbina eólica}) \quad (14)$$

Este límite de betz dice que nunca el viento será capaz de entregar más que  $\frac{16}{27} = C_p$  de su potencia a una turbina.

## 2.3 Rotor savonius

Tocante las turbinas eólicas figuran: HAWT y VAWT. Se utiliza principalmente dos clases de Turbinas Eólicas de eje vertical: la turbina eólica savonius y la darrieus.

El Rotor savonius es un dispositivo aerodinámico de tipo arrastre, orientado verticalmente y caracterizado por su sencillez y fácil operación. Su forma geométrica semicilíndrica se ajusta mediante un eje vertical y se compone de tres o dos palas. La fuerza que ejerce el viento en la parte cóncava y convexa de la pala son diferentes, por tanto que las palas giran alrededor del eje (Hidalgo et al., 2018). El rotor savonius funciona independiente de la dirección del viento a menor velocidad, causando menos ruido comparado con otros tipos de Turbinas Eólicas.

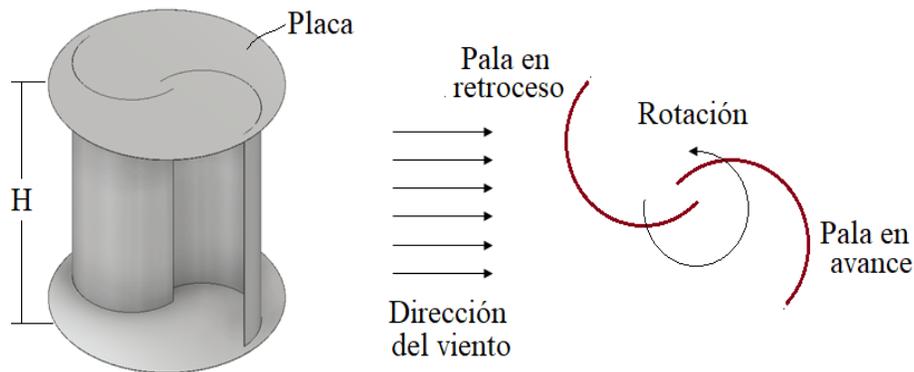


Figura 3. Descripción del funcionamiento de un rotor savonius (Hidalgo et al., 2018)

La eficiencia aerodinámica de las turbinas eólica savonius es muy baja, por esta razón se han realizado estudios experimentales, teóricos y numéricos dirigidos a crear un nuevo diseño, de los cuales se demuestra que el rendimiento de los rotores savonius está en función del número de palas, el número de etapas y los parámetros geométricos, las medidas más críticas del diseño de un rotor savonius son, el diámetro total de la turbina ( $D$ ), altura total de la turbina ( $h$ ), pala de solapamiento ( $e$ ) y longitud de cuerda de la cuchilla. De estos parámetros obedece la relación de aspecto y de superposición, que cumple un desempeño decisivo en la potencia deseada y las características del Par.

## 2.4 Diseño de un rotor savonius

Para el diseño de un rotor tipo Savonius es necesario tener en cuenta el espaciado entre palas, número de palas, esbeltez, posicionamiento de las palas y los discos laterales que corresponden a la base del rotor, como se muestra en la figura 4.

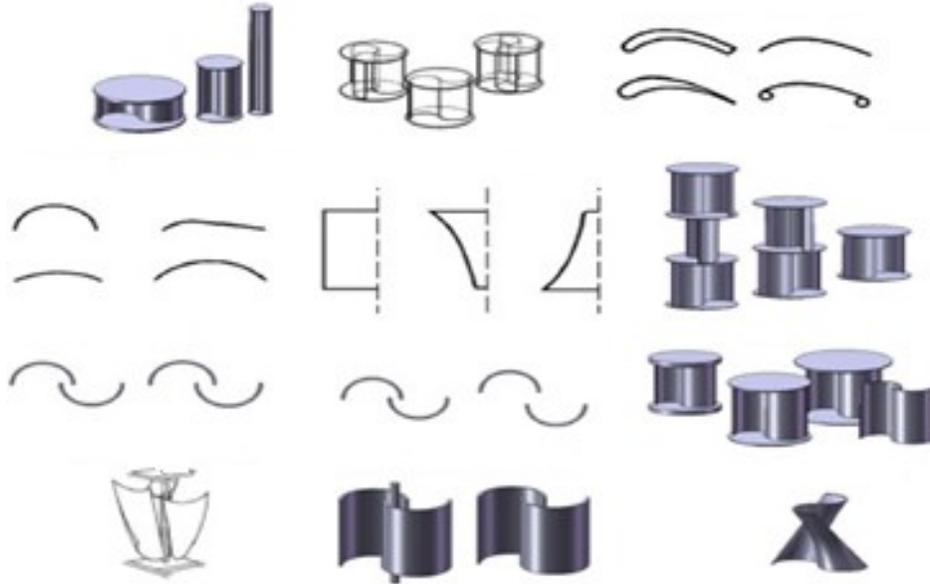


Figura 4. Alternativas de diseño rotor savonius (Kothe et al., 2020)

### 2.4.1 Rendimiento de los rotores savonius

El Rendimiento de un Rotor Savonius está dado por el coeficiente de potencia  $C_p$  (15), que a su vez  $C_p$  depende del número de etapas del Rotor. En estudios experimentales se indica que cuando el rotor Savonius tiene dos números de etapas alcanza el  $C_p$  máximo, mientras que a partir de tres etapas el  $C_p$ , desciende debido al aumento de la inercia (Harpe et al., 2015). A su vez los rotores Savonius cuentan con el coeficiente del Par  $C_m$  (16) principal responsable del arranque del Rotor, el Par puede ser estático o dinámico. Por otra parte, el TSR (17) que ejecuta una labor decisiva en el rendimiento del Rotor se denomina Velocidad Específica, es decir la relación existente entre la velocidad de la Pala y la velocidad del Viento.

$$C_p = \frac{P_T}{P_A} = \frac{P_T}{\frac{1}{2}\rho S V^3} \quad (15)$$

$$C_m = \frac{T}{T_w} = \frac{C_p}{TSR} \quad (16)$$

$$TSR = \frac{V_{Rotor}}{V} = \frac{wR}{V} \quad (17)$$

La fuerza de arrastre resultante de la diferencia de fuerzas de arrastre correspondiente de los dos alabes, está dada por la siguiente ecuación.

$$F_{arr} = \frac{1}{2} \rho S \{(v + u)^2 - 0.2(v - u)^2\} \quad (18)$$

$$N_{\acute{u}til} = \frac{1}{2} \rho S \{(v + u)^2 - 0.2(v - u)^2\} u \quad (19)$$

Donde  $(v + u)$  corresponde a la velocidad del viento en la parte convoca (intradós) y  $(v - u)$  en la parte convexa (extradós).

Otra expresión de la potencia útil está en función del factor  $k$  de conversión de la energía del viento es,

$$N_{\acute{u}til} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \eta k \quad (20)$$

## 2.5 Parámetros influyentes en el rendimiento de rotores tipo savonius.

### 2.5.1 Número de palas

Teniendo en cuenta que no existe un procedimiento que evalúe con exactitud el rendimiento de un rotor Savonius, se ha consumado diversas pruebas con diseños múltiples de rotores Savonius en túneles de viento de 6 a 11 m/s. Las pruebas realizadas resuelven que el número de palas cumple una función substancial en el rendimiento del rotor, estos estudios proyectan que el coeficiente de potencia disminuye acorde al aumento de palas asciende

de dos a tres, el número de palas óptimo para un rotor savonius es de dos, debido a su influencia en el rendimiento, así mismo se demuestra que la forma de la alabes retorcidos muestran mejor rendimiento que con los rotores con alabes semicirculares.

### 2.5.2 Relación de superposición

Esta relación determina la distancia de superposición entre la pala y la longitud de cuerda de la Pala e interviene directamente en el rendimiento del rotor savonius (Kothe et al., 2020). En la investigación experimental realizada por (Saad et al., 2020) describe el efecto de la relación de superposición en un rango 0 a 0.35 comprobando que el rotor Savonius sin Relación de Superposición proporciona un mejor rendimiento en comparación con los Rotores con relación de Superposición. No obstante, (Zemamou, 2017) enuncia que los rotores Savonius convencionales manifiestan mejor rendimiento con una relación de superposición de 0,15 mientras que en los rotores modificados el mejor rendimiento era obtenido con una relación de superposición de cero.

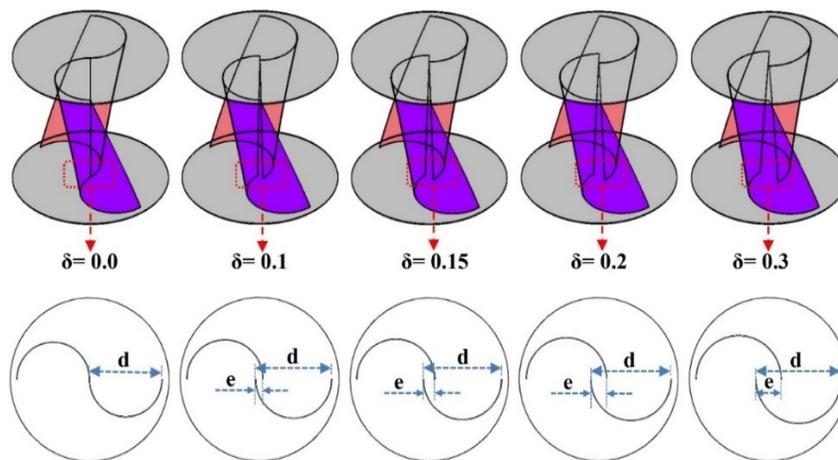


Figura 5. Relación de superposición en rotores savonius (Saad et al., 2020)

### 2.5.3 Relación de aspecto

La relación de aspecto describe la relación existente entre el diámetro. La altura. Juega un papel sumamente importante en el rendimiento del rotor Savonius. Diversos estudios coinciden en que el coeficiente de potencia aumenta conforme a la relación de aspecto. Investigaciones en las que se demuestra que en un rango de 0.6 a 1.0, el coeficiente de potencia máximo se dio a partir de 0.7 (Mahmoud, 2012)

## 2.6 Perfil alar

Se denomina perfil alar a un objeto o estructura con características determinadas que, al desplazarse a través de un fluido, llámese fluido (aire/agua) es capaz de crear a su alrededor una distribución de presiones y que a su vez genera una fuerza denominada fuerza de sustentación (Troncoso, 2014).

Los perfiles alares cuentan con una geometría determinada que tiene como finalidad aprovechar al máximo las fuerzas que se originan debido a las variaciones de velocidad y presión cuando este está situado en una corriente de aire, estas fuerzas que se originan pueden empujar el cuerpo en la dirección de la corriente, la cual se denomina arrastre o resistencia y que dependen del ángulo de ataque, con base a esto se sabe si se incrementa o se disminuye, el ángulo de ataque es aquel que forman la cuerda geométrica de un perfil alar con la dirección del aire incidente. Es un parámetro que influye decisivamente en la capacidad de generar sustentación de un ala o en la capacidad de generar tracción en las palas de una hélice (Harpe et al., 2015). Ver figura 6



Figura 6. Ángulo de ataque con respecto a la dirección del viento (Harpe et al., 2015)

## 2.7 Geometría del perfil alar

Se hace necesario definir la geometría del perfil alar, debido a que su forma e inclinación respecto a la dirección de la corriente de aire son de gran importancia en la distribución de presiones que dan origen a la sustentación del mismo.

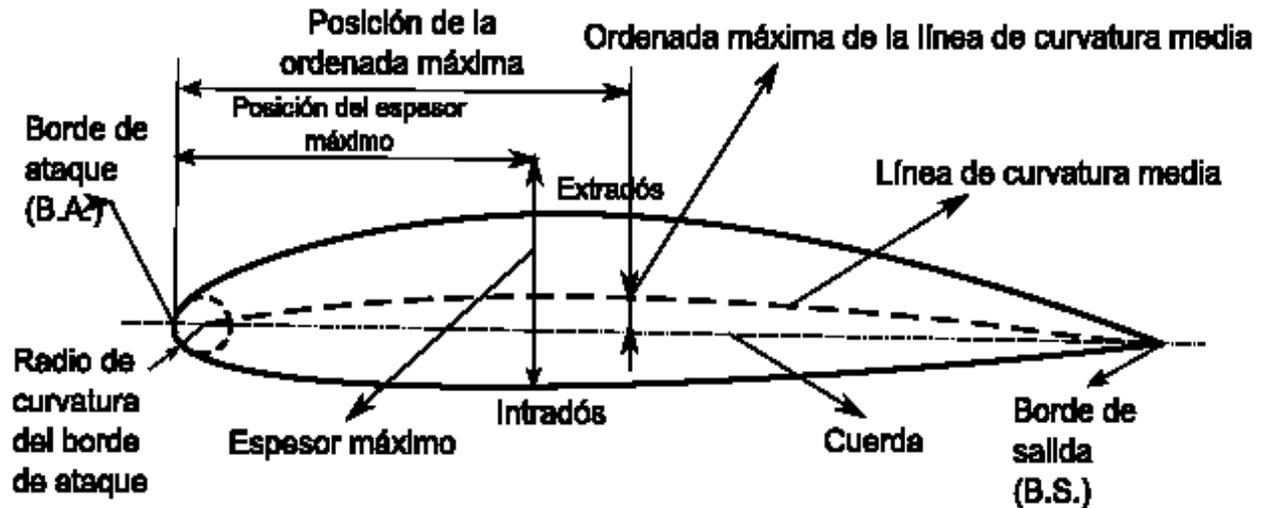


Figura 7: Geometría del perfil alar (Harpe et al., 2015)

Según la figura anterior se definen los siguientes términos:

- Borde de ataque: Ubicado en la parte delantera del perfil, allí incide la corriente de aire.
- Borde de salida: Este es la parte trasera del perfil alar, en donde finaliza el recorrido de la corriente de aire.
- Extradós: Zona superior del perfil alar, comprendida entre el borde de ataque y el borde de salida.
- Intradós: Zona inferior del perfil alar, comprendida entre el borde de ataque y el borde de salida.
- Cuerda: Línea recta imaginaria que conecta el borde de ataque con el borde de salida.
- Línea de curvatura media: Es aquella línea imaginaria que conecta puntos equidistantes entre el intradós y el extradós.
- Espesor máximo y su posición: Punto en el cual la distancia entre el extradós e intradós es máxima, su valor y posición se expresan en porcentajes de la cuerda.

- Ordenada máxima y su posición: Punto en el cual la distancia entre la línea de curvatura media y la cuerda es máxima, el valor de la ordenada máxima y su posición ayudan a definir la forma de la línea de la curvatura media, su valor y posición se expresan en porcentajes de la cuerda.
- Radio de curvatura del borde de ataque: Es quien da la forma del borde de ataque y es el radio de un círculo tangente al extradós e intradós que tiene su centro en la línea tangente al inicio de la línea de curvatura media.

## 2.8 Perfil NACA

Antes de 1930, los dibujantes proyectistas del sector aeronáutico no contaban con herramientas adecuada al momento de escoger un perfil alar, debido a esto el diseño y la elección del perfil alar era un tanto personalizado y no cumplía con un análisis dimensionado en el campo analítico. (Anderson, 1999).

Con base a todo esto la NACA decidió adoptar un estudio sistemático y racional para el correcto diseño de los perfiles, dicho estudio se basaba en pruebas exhaustivas en túneles de viento para el análisis de las propiedades y características inherentes de cada perfil.

El estudio necesitaba tener una nomenclatura efectiva para tener una clasificación ordenada y detallada con el fin de suministrarle toda esta información a un cliente final (Paz, 2013).

Las primeras series de perfiles NACA fue la de 4 dígitos, 5 dígitos y las modificadas de 4 y 5 dígitos fueron generados usando ecuaciones que describen la curvatura de la línea media del perfil y la distribución del espesor del perfil alar. Familias posteriores, incluyendo la serie 6, son series más complicadas derivadas de métodos teóricos en lugar de los métodos geométricos.

### 2.8.1 Serie NACA 4 dígitos

La primera serie de perfiles que la NACA decidió generar fue la de 4 dígitos, y este acontecimiento se dio a principios de 1930. Para la descripción de dicha nomenclatura se usara como ejemplo el perfil 6406 de 4 dígitos.

Tabla 1. Descripción serie naca 4 dígitos, perfil 6506 (Paz, 2013).

6	Camber máximo en porcentaje de la cuerda.
5	Localización del camber máximo en la décima de la cuerda
0	Máximo espesor en porcentaje de la cuerda
6	Máximo espesor en porcentaje de la cuerda

Según la definición de la naca, representada en la tabla anterior se tiene que para el perfil alar 6506.

- El camber máximo del perfil es del 6% de la longitud de la cuerda, defínase camber como la distancia máxima que existe entre la línea de la cuerda y la línea de curvatura media.
- El camber máximo en la décima de la cuerda del perfil 6506 está localizado en el 60% de la longitud de la cuerda medido desde el borde de ataque.
- Valido anotar que el máximo espesor del perfil alar de 4 dígitos se ubica por defecto al 30% de la cuerda medido desde el borde de ataque, es decir para el perfil 6506 NACA tiene un máximo espesor del 6% la longitud de la cuerda @30%C.

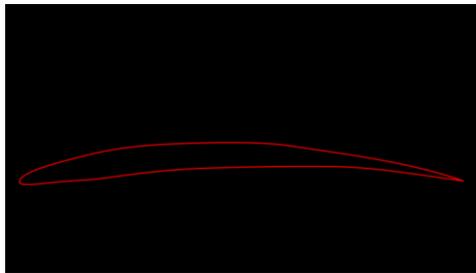


Figura 8. Representación de perfil naca 6506 (Harpe et al., 2015)

Una restricción que tiene este tipo de diseño de perfiles es que la posición del espesor máximo está fijada en 0.3 para toda la serie de 4 dígitos.

## 2.9 Fluidodinámica computacional CFD

La fluidodinámica computacional es una herramienta de simulación que trabaja en compañía de una computadora, ligada a la mecánica de fluidos y matemática aplicada para modelar situaciones de flujo de fluidos para la predicción de transferencia de calor, masa y momento sin dejar por fuera su aplicación en el modelamiento y diseño óptimo en procesos industriales.

El proceso de fluidodinámica computacional se subdivide en tres etapas.

- **Pre procesamiento:** Se genera geometría, se procede al mallado de la misma y a su configuración para la simulación. En la generación de la geometría, se importa la geometría CAD de la pieza y su dominio a estudiar. A la geometría importada en el espacio de trabajo se le hace el proceso de mallado, el cual tiene como único objetivo discretizar un espacio como lo es el dominio de la geometría, en espacios más pequeños denominados nodos, donde se pueden resolver abreviadamente el conjunto de ecuaciones diferenciales, las cuales se analizan y se predice el comportamiento de los fluidos. Dependiendo del tipo de malla las celdas se puede realizar de dos formas: Estructuradas donde cada celda es independiente de su ubicación, pero debe cumplir una regla general, estas pueden tener forma de cuadrilátero en 2D y hexaedros en 3D cumpliendo con un patrón. Las No estructuradas en cambio no tienen una orientación específica ni un patrón uniforme, lo cual produce que sean idóneas para el mallado de geometrías complejas, en este caso son una mezcla de cuadriláteros y triángulos en 2D y tetraedros y hexaedros en 3D. (García & Rodríguez, 2014). En la configuración de la simulación se definen las condiciones de frontera como son la entrada y salida del fluido, la velocidad del mismo, si hay una presión constante o no en el dominio, etc. (Bustamante, 2014).
- **Procesamiento:** En esta etapa del proceso se solucionan las ecuaciones diferenciales planteadas en el pre-procesamiento, cabe anotar que el tiempo de solución dependerá de diferentes factores tales como el número de elementos en el mallado y las características técnicas del equipo usado para la simulación.
- **Pos procesamiento:** Esta etapa está definida por el análisis de los resultados obtenidos y por la visualización de los mismos (Harpe et al., 2015).

### 2.9.1 Ecuación del movimiento de cuerpo rígido

Esta ecuación indica que para un cuerpo rígido que experimenta traslación y rotación la tasa de cambio generada por el momento lineal  $P$  y  $\pi$  es igual a la fuerza y par,  $F$  y  $m$  aplicados respectivamente sobre el cuerpo.

$$\frac{dP}{dt} = F \quad (21)$$

$$\frac{d\pi}{dt} = m \quad (22)$$

## 2.9.2 Ecuación rotacional del movimiento

La ecuación de movimiento rotacional para un cuerpo rígido giratorio puede describirse en coordenadas fijas.

$$\dot{\theta} \times I\dot{\theta} + I\ddot{\theta} = m \quad (23)$$

La ecuación 9 representa la forma de coordenadas espaciales para la ecuación clásica de Euler para el cuerpo rígido en coordenadas fijas

Donde  $m$  es el momento total de todas las contribuciones separadas

$$m = m_{Aero} - k_{Rotate}(\theta - \theta_{so}) + m_{ext} \quad (24)$$

Donde  $I$  es el momento de inercia y está definido como:

$$I = \begin{bmatrix} \int ((y - y_G)^2 + (z - z_G)^2) dm & - \int (x - x_G)(y - y_G) dm & - \int (x - x_G)(z - z_G) dm \\ - \int (x - x_G)(y - y_G) dm & \int ((x - x_G)^2 + (z - z_G)^2) dm & - \int (y - y_G)(z - z_G) dm \\ - \int (x - x_G)(z - z_G) dm & - \int (y - y_G)(z - z_G) dm & \int ((x - x_G)^2 + (y - y_G)^2) dm \end{bmatrix} \quad (25)$$

El momento de masa de la matriz de inercia dada, el centro de masa es  $(x_G, y_G, z_G)$  y  $dm$  es un elemento diferencial de masa.

## 2.9.3 Modelos de turbulencia

La turbulencia tiene un efecto significativo en las características del flujo, ocurre cuando la fuerza de inercia en el fluido se vuelve significativa en comparación a las fuerzas viscosas

y es caracterizado por un alto número de Reynolds. Los modelos de turbulencias de dos ecuaciones son muy utilizados, este tipo de modelo utilizan la hipótesis de difusión de gradientes con el fin de relacionar el número de Reynolds

En los modelos de dos ecuaciones la escala de velocidad de turbulencia se calcula en función de la energía cinética de turbulencia.

K describe la energía cinética de turbulencia, definida por las fluctuaciones de la velocidad.

La ecuación de continuidad está definida como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (26)$$

La ecuación de impulso se describe como:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial \rho'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad (27)$$

Donde  $S_M$  describe la suma de todos los cuerpos,  $\mu_{eff}$  coeficiente de viscosidad efectiva para turbulencia y  $\rho'$  presión modificada.

El coeficiente de viscosidad cinética se describe como

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (28)$$

$\mu_t$  Es la viscosidad de turbulencia y se calcula:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (15)$$

$C_\mu$  Es un constante. Los valores de  $k$  y  $\varepsilon$  provienen directamente de las ecuaciones de transporte diferencial, para la energía cinética de turbulencia y tasa de disipación de turbulencia.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_j} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_K - \rho \varepsilon + P_{kb} \quad (29)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon b}) \quad (30)$$

$C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$  y  $\sigma_\varepsilon$  son constantes,  $P_k$  y  $P_{\varepsilon b}$  representan la influencia de la fuerza de flotabilidad, la ecuación de las fuerzas viscosas se modelan usando la siguiente ecuación.

$$P_k = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \left( 3\mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \quad (31)$$

## **3.METODOLOGÍA**

La metodología implementada en el presente trabajo de grado es de tipo cuantitativa y exploratoria dado que su solución depende de una base numérica en la que se identifican los modelos matemáticos correspondientes para estimaciones específicas aplicadas a la mecánica de fluidos, aerodinámica y análisis por medio de elementos finitos. Lo que corresponde a la etapa exploratoria de evaluación del rendimiento entre dos tipos de características del diseño de los alabes de una turbina eólica tipo Savonius.

El desarrollo de la etapa metodológica corresponde a los siguientes ítems.

### **3.1 Identificación de perfil aerodinámico**

En esta etapa se identifican las características de un perfil alar. El cual en su teoría indica que al desplazarse a través de una corriente de aire es capaz de crear a su alrededor una distribución de presiones que genere sustentación, además de la relación aerodinámica con el perfil NACA seleccionado.

### **3.2 Configuración de la geometría del rotor Savonius**

Dentro de la gran variedad de tipos de rotores de eje vertical, existe la clasificación denominada rotor Savonius el cual es el objeto de estudio del presente trabajo de investigación al comparar la fluidodinámica del mismo con una modificación en sus alabes.

### **3.3 Métodos de cálculo para el coeficiente de potencia de rotores Savonius**

La determinación del coeficiente de potencia se lleva a cabo por medio de recolección de datos en fuentes especializadas, tales como artículos de investigaciones recientes sobre la funcionalidad de los rotores Savonius al utilizar modelos matemáticos que permitan estimar el comportamiento fluido dinámico y de generación energética de los mismos.

### 3.4 Desarrollo del modelado CAD

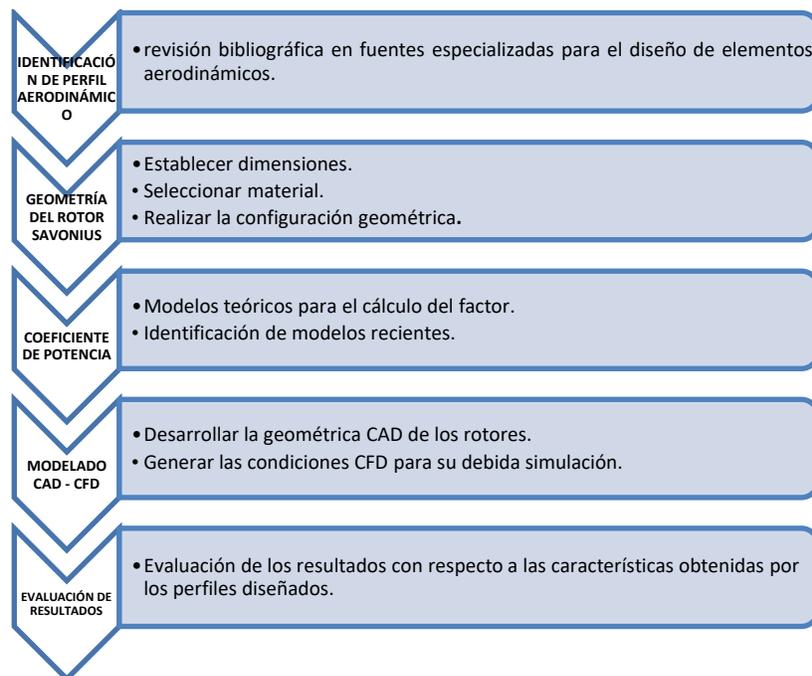
Se generan las características geométricas de los modelos seleccionados implementando herramientas computacionales para la representación de elementos sólidos digitales, esta herramienta permite establecer las propiedades físicas y mecánicas de sistemas vitales para el desarrollo analítico de los modelos matemáticos teóricos de los rotores Savonius.

### 3.5 Simulación por medio de software CFD

Esta herramienta permite calcular los efectos físicos del comportamiento de los fluidos por medio de análisis iterativo realizando debidas asignaciones de condiciones de frontera y desratización de variables, estableciendo una amplia gama de modelos característicos para soluciones específicas en el área de la aerodinámica de rotores Savonius.

### 3.6 Evaluación de resultados

Obtenidas las simulaciones de los perfiles geométricos identificados como objetos de estudio, se hace la evaluación del comportamiento de las características fluido dinámicas y mecánicas para así establecer cuál de los modelos CAD seleccionados aporta el mejor comportamiento, se evaluará el coeficiente de potencia generada de ambos modelos.



### 3.7 Selección del perfil NACA

Para la selección del perfil NACA es necesario encontrar una geometría de perfil que cuente con la concavidad que caracteriza al alabe de rotor Savonius. En disposición existen diversos tipos de perfiles NACA.

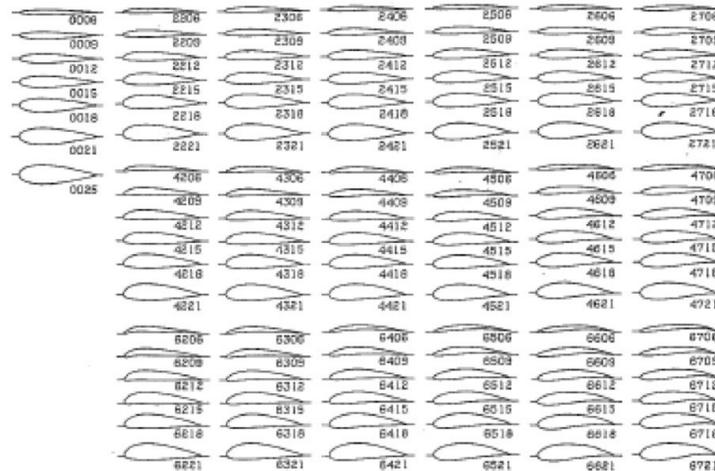


Figura 9. Familia NACA 4 dígitos (Harpe et al., 2015)

De la amplia gama de perfiles de la familia NACA se selecciona la serie de 4 dígitos y en particular el perfil 6506 por su alta relación de sustentación y porque cuenta con mayor concavidad, es por ello que resultan ideales al adaptarla al alabe del rotor Savonius.

### 3.8 Modelado CAD

La herramienta computacional para diseño asistido por computador SolidWorks® en el cual se adaptan los modelos propuestos por (Pulfer et al., 2017) obteniéndose los siguientes perfiles para estudiar.

Tabla 2. Propiedades material ABS utilizado para ambos rotores

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2000	N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de poisson	0.394	N/D
Módulo cortante	318.9	N/mm <sup>2</sup>
Densidad de masa	1020	Kg/m <sup>3</sup>
Límite de tracción	30	N/mm <sup>2</sup>
Límite de compresión		N/mm <sup>2</sup>
Límite elástico		N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de expansión térmica		/k
Conductividad térmica	0.2256	W/(m*k)

### 3.8.1 Esquema y tabla rotor savonius convencional

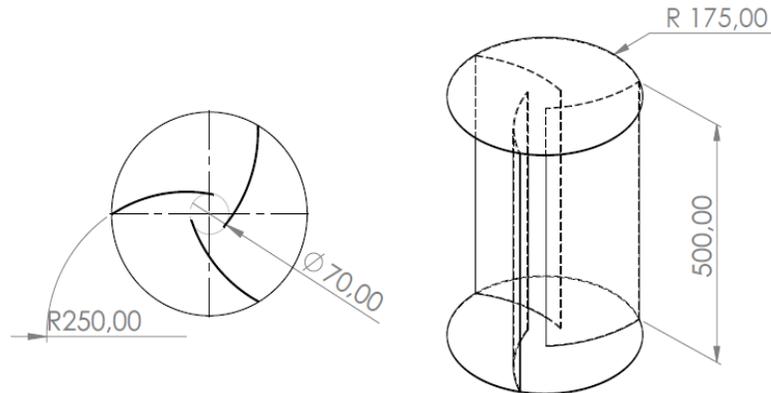


Figura 10. Geometría del rotor savonius convencional

Tabla 3. Propiedades del rotor savonius sin alabe naca

Masa = 969.76 gramos		
Volumen = 950745.89 milímetros cúbicos		
Área de superficie = 962653.19 milímetros cuadrados		
Centro de masa: (milímetros)		
X = 0.00		
Y = 250.00		
Z = 0.00		
Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * milímetros) medido desde el centro de masa.		
lx = (0.00, 1.00, 0.00)	Px = 12422491.14	
ly = (0.00, 0.00, 1.00)	Py = 42967306.87	
lz = (1.00, 0.00, 0.00)	Pz = 42967306.87	
Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)		
Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas		
Lxx = 42967306.87	Lxy = 0.00	Lxz = 0.00
Lyx = 0.00	Lyy = 12422491.14	Lyz = 0.00
Lzx = 0.00	Lzy = 0.00	Lzz = 42967306.87
Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)		
Medido desde el sistema de coordenadas de salida.		
lxx = 103577357.35	lxy = 0.00	lxz = 0.00
lyx = 0.00	lyy = 12422491.14	lyz = 0.00
lzx = 0.00	lzy = 0.00	lzz = 103577357.35

### 3.8.2 Esquema y tabla rotor savonius con alabe naca 6506

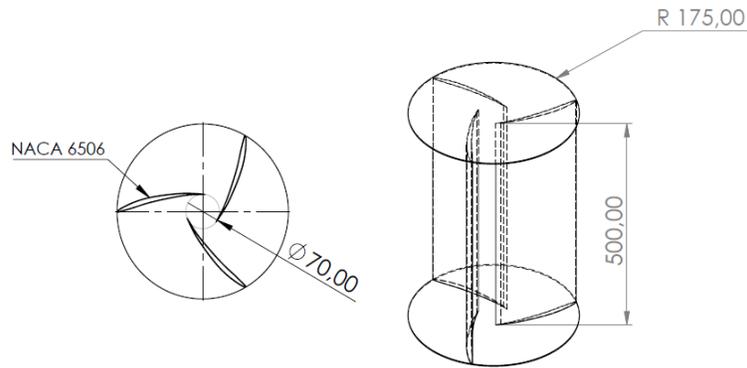


Figura 11. Rotor savonius con alabe naca 6506

Tabla 4. Propiedades rotor savonius con alabe naca 6506

Masa = 976.79 gramos
Volumen = 957637.28 milímetros cúbicos
Área de superficie = 1495063.96 milímetros cuadrados
Centro de masa: (milímetros) X=0.44 Y=251.27 Z= 0.03
Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * milímetros) medido desde el centro de masa. Ix = ( 0.00, 1.00, 0.00)    Px = 12927756.51 Iy = (-0.95, 0.00, -0.33)    Py = 43913708.99 Iz = (-0.33, 0.00, 0.95)    Pz = 43939181.64
Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados) Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas Lxx = 43916256.21    Lxy = 69261.18    Lxz = 7798.63 Lyx = 69261.18    Lyy = 12927924.53    Lyz = -20263.63 Lzx = 7798.63    Lzy = -20263.63    Lzz = 43936466.39
Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados) Medido desde el sistema de coordenadas de salida. Ixx = 105588585.61    Ixy = 177593.98    Ixz = 7812.65 Iyx = 177593.98    Iyy = 12928115.86    Iyz = -12284.09 Izx = 7812.65    Izy = -12284.09    Izz = 105608985.06

### 3.8.3 Esquema y tabla rotor savonius con perfil NACA adaptado

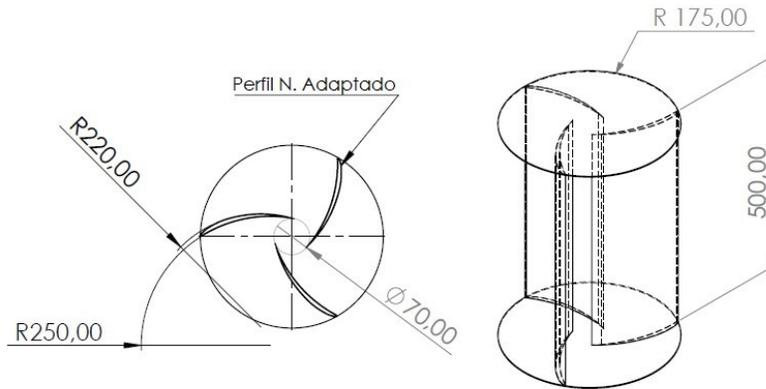


Figura 12. Rotor Savonius con perfil naca adaptado

Tabla 5. Propiedades savonius con alabe naca adaptado

Masa = 967.33 gramos
Volumen = 948363.88 milímetros cúbicos
Área de superficie = 1496710.44 milímetros cuadrados
Centro de masa: (milímetros) X= -0.02 Y=250.11 Z= 0.04
Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * milímetros) medido desde el centro de masa. Ix = ( 0.00, 1.00, 0.00) Px = 13475166.52 Iy = ( 0.25, 0.00, 0.97) Py = 43881083.34 Iz = ( 0.97, 0.00, -0.25) Pz = 43897286.29
Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados) Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas Lxx = 43896288.64 Lxy = -3595.05 Lxz = 3893.14 Lyx = -3595.05 Lyy = 13475168.81 Lyz = 7527.51 Lzx = 3893.14 Lzy = 7527.51 Lzz = 43882078.69
Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados) Medido desde el sistema de coordenadas de salida. Ixx = 104409400.23 Ixy = -8017.69 Ixz = 3892.46 Iyx = -8017.69 Iyy = 13475170.54 Iyz = 16756.96 Izx = 3892.46 Izy = 16756.96 Izz = 104395189.19

### 3.9 Simulación por fluidodinámica computacional.

Para la simulación por fluidodinámica computacional del rotor savonius, se empleará el software ANSYS, el cual ofrece distintos módulos de trabajo. Primero se simulara el rotor savonius convencional y luego el rotor Savonius adoptando el perfil NACA seleccionado, estas simulaciones están regidas por el módulo Wordbench el cual ofrece diversas simulaciones, de las cuales se selecciona fluid flow CFX (cuenta con el aplicativo para la simulación de rotores).

Luego de esto se inicio el proceso de simulación de la siguiente manera:

Geometría: En el inicio de la geometría se exportan los datos trabajados en Solidwork®, es decir, la geometría de la turbina eólica Savonius, se realizan los ajustes pertinentes a la geometría para la correcta simulación y una vez que se tenga la geometría que vaya a simular, se procede al mallado de la misma.

### 3.10 Mallado de geometría.

Se procede insertando la geometría en el área de mallado, y genera una malla por defecto adicional a la malla generada por el mismo software, la malla generada se edita debido a que la que se genera por defecto no cuenta con las propiedades necesarias para la correcta simulación, entonces se procede a la edición de la misma seleccionando una forma triangular y se inserta el método de curvatura en su configuración para refinar la forma de la malla con un tipo de conexión unificada entre el fluido y la turbina para obtener el siguiente mallado volumétrico en donde se revisa al detalle el mallado de la turbina y la calidad de la malla generada.

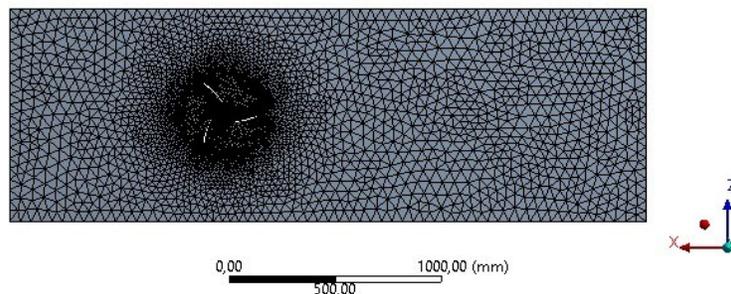


Figura 13: Mallado volumétrico sección transversal - Vista superior

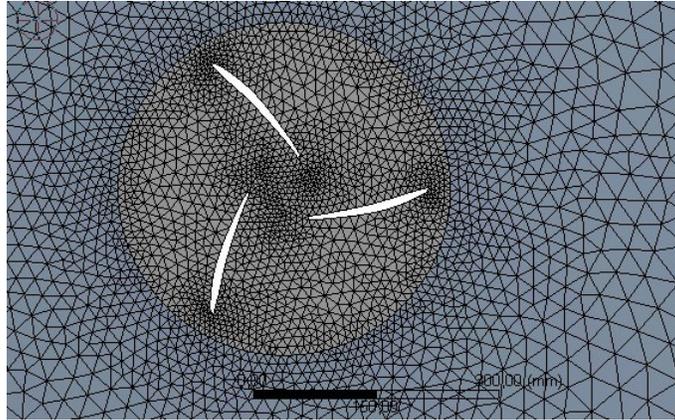


Figura 14: Mallado de turbina

En la revisión del mallado se puede revisar la calidad del mismo, revisando la métrica de la calidad de los elementos, lo cual indica que entre más cercano estén estos valores al cero (0) mayor calidad se obtiene en los elementos generados, en el cual se muestran la calidad de la malla y las estadísticas del mallado.

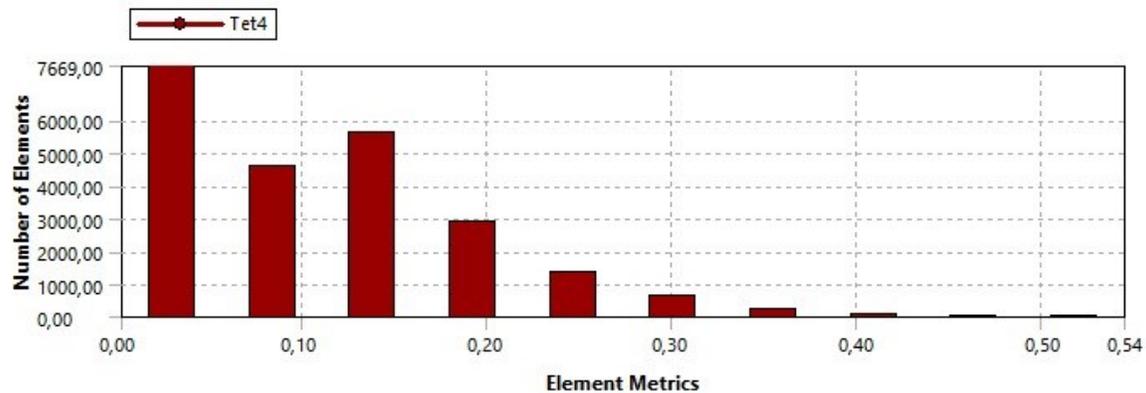


Figura 15: Calidad del mallado.

Statistics	
Nodes	8191
Elements	23014

Figura 16: Estadísticas del mallado.

Luego de revisar la calidad del mallado se procede a la asignación de frontera, en el cual se asignan nombre a cada frontera, entrada, salida, simetría, interface1 e interface 2 y turbina a las distintas caras de la geometría y se obtiene las condiciones de frontera.

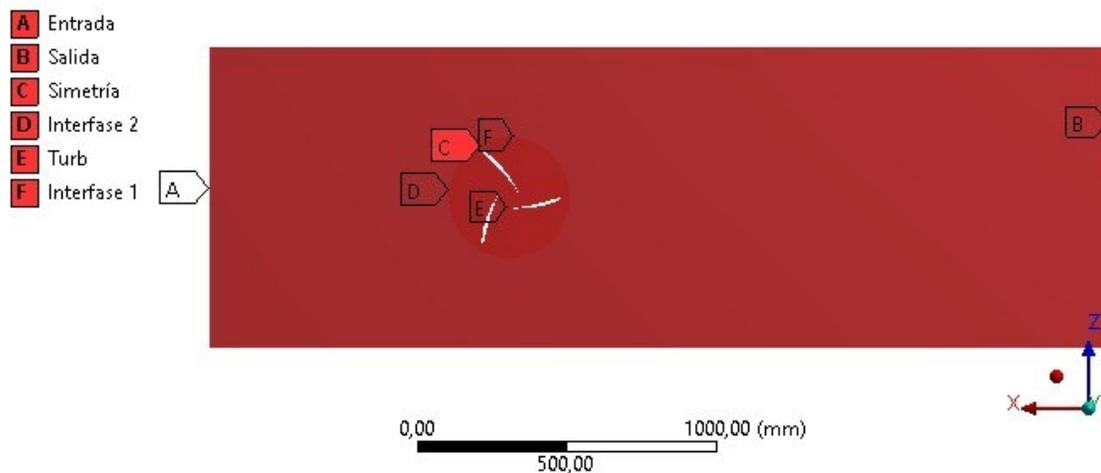


Figura 17: Condiciones de frontera.

Luego de los procesos anteriores se procede a la preparación de la simulación en donde se insertan todas las condiciones para la simulación a realizar.

- Conservación de masa y momentos
- Conexión de malla automática
- Tipo de análisis transitorio, hasta 30 sec. (suficiente para encontrar la estabilización de la turbina)
- Saltos de tiempo serán de 0.1 sec; es decir 300 saltos de tiempo partiendo de cero.
- En la salida de control se guarda cada salto de tiempo en el cual las condiciones iniciales serían: velocidades cero (0), presión relativa (0).
- Se revisan las condiciones de modelación: Aire, fluido continuo, presión referencia 1Atm, malla giratoria en región especificada, entre otros.
- Condiciones iniciales de modelación: cero (0)
- Se insertan las propiedades del cuerpo antes relacionadas: Masa y componentes de inercia.
- Se procede a la simulación ya configurada en movimiento de malla de cuerpo rígido ignorando la traslación y solo tomando su rotación



## 4.RESULTADOS

Diversos estudios dirigidos a mejorar la eficiencia del rotor savonius en trabajos anteriores se fundamentan en la variación de parámetros geométricos como la relación de superposición y la relación de aspecto, pero aún la configuración de un rotor savonius con perfil Naca no se ha estudiado antes, para comparar el desempeño de un rotor savonius convencional contra un rotor savonius adaptando un perfil NACA en su alabe, Se emplean las dimensiones del rotor expuestas en la figura 10,11 y 12 y, un mallado que se describe en la figura 5, se indicó un análisis transitorio con saltos de tiempo de 0.1 segundos hasta llegar a 30 segundos, en los cuales los gráficos de convergencia se comportaron con un error de  $10^{-2}$

Los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas se muestran en las figuras descritas a continuación, donde se muestra el comportamiento de las 3 diferentes configuraciones a una velocidad de 5 m/sg.

La velocidad de la punta del alabe del rotor savonius convencional alcanza su máximo valor en el centro del rotor, se observa que la velocidad de la punta de uno de sus alabes tiende a aumentar mientras que en el otro extremo se mantiene invariable.

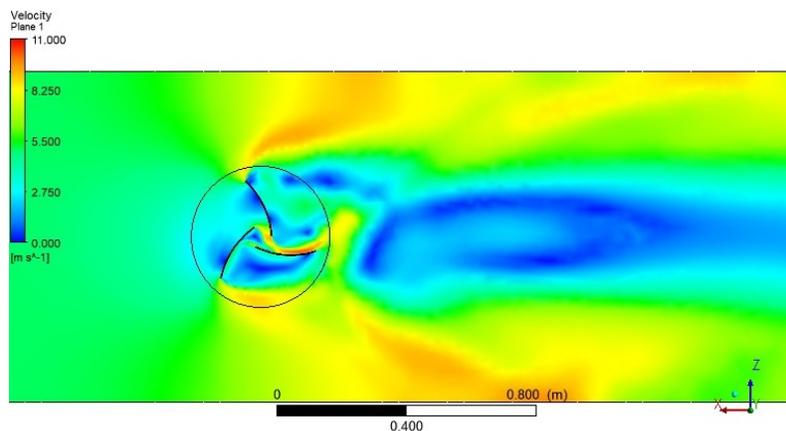


Figura 18. Rotor savonius convencional velocidad 5 m/s

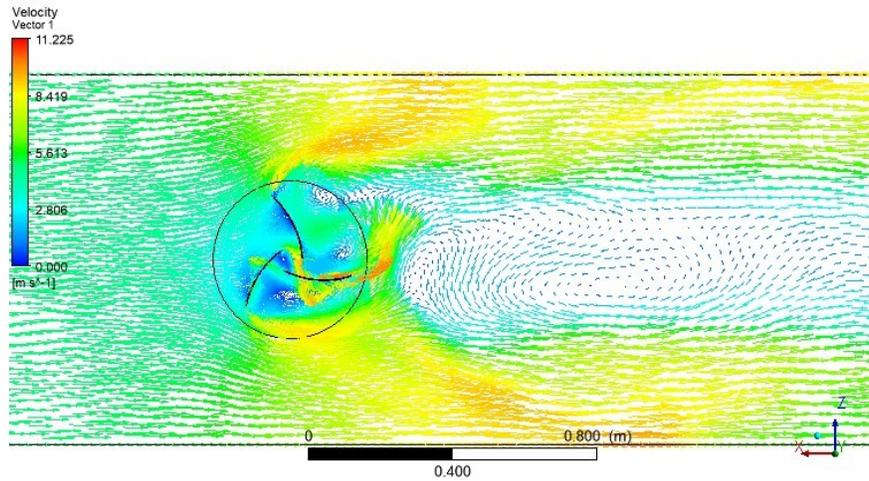


Figura 19. Representación vectorial del rotor savonius a 5m/s

En la figura 20, se puede apreciar el principio de funcionamiento de un rotor savonius, se puede observar que el rotor en dos de sus alabes presenta mayor zona de contacto y el vacío generado.

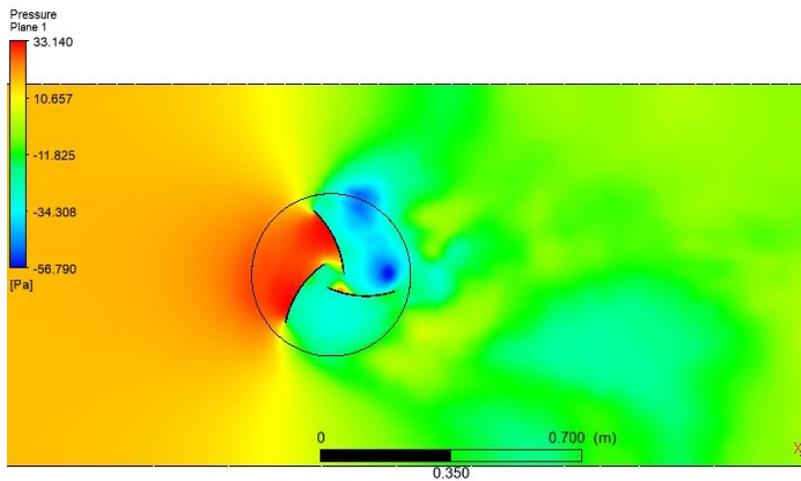


Figura 20. Esquema de presión del rotor savonius convencional

En la figura 21. Se observa que la velocidad se acrecienta en dos de las puntas del alabe del rotor savonius con alabe naca 6505, logrando el comportamiento de estala del viento y, aunque en la parte cóncava de uno de sus alabes se registra la velocidad máxima, la velocidad de la punta del alabe es baja.

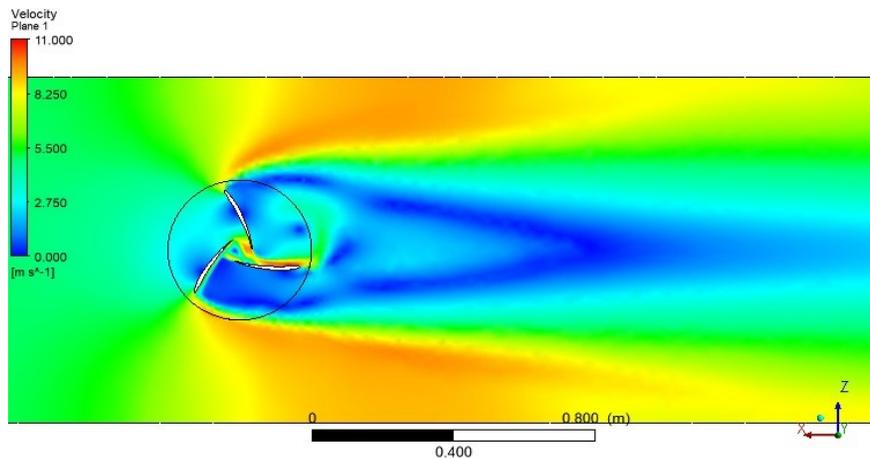


Figura 21. Rotor savonius convencional con alabe naca 6505 velocidad 5 m/s

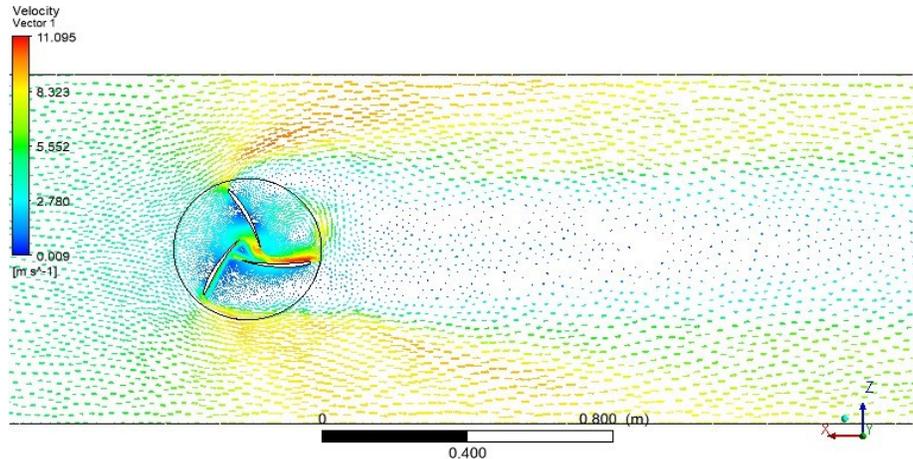


Figura 22. Representación vectorial del rotor savonius con alabe naca 6505 a 5m/s

El rotor savonius con alabe Naca también registra buena zona de contacto en dos de sus alabes y la zona de vacío es mayor en el alabe del centro.

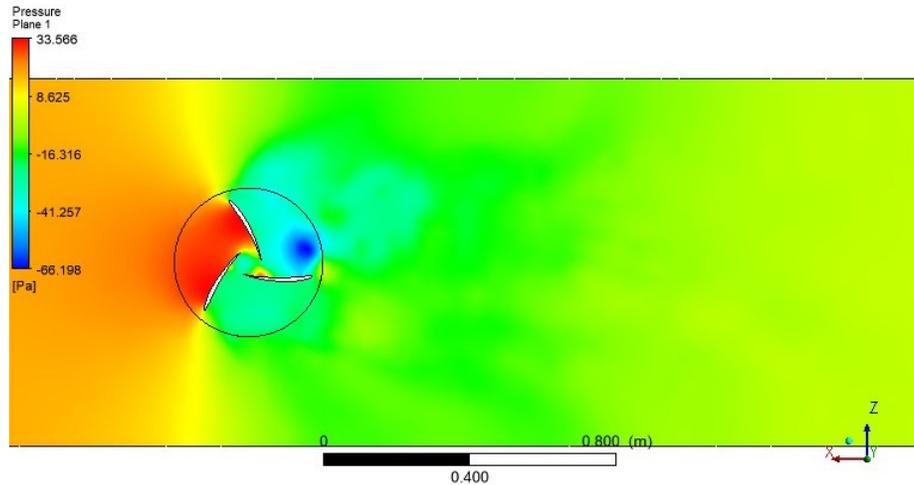


Figura 23. Esquema de presión del rotor savonius con alabe naca 6505

La velocidad de dos de las puntas del alabe del rotor savonius con alabe naca adaptado, alcanza el comportamiento de la estela de viento, se puede observar que la velocidad se incrementa en el centro del rotor por el impulso de la velocidad de salida de uno de los alabes.

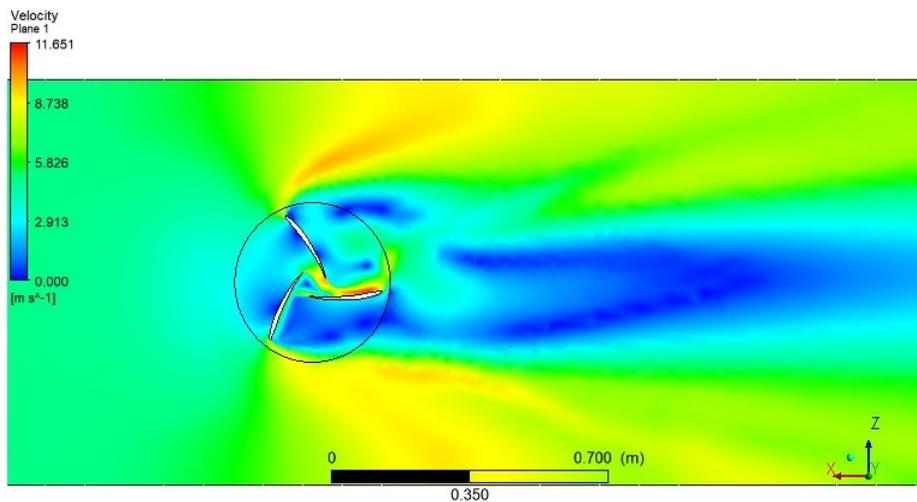


Figura 24. Rotor savonius convencional con alabe naca adaptado velocidad 5 m/s

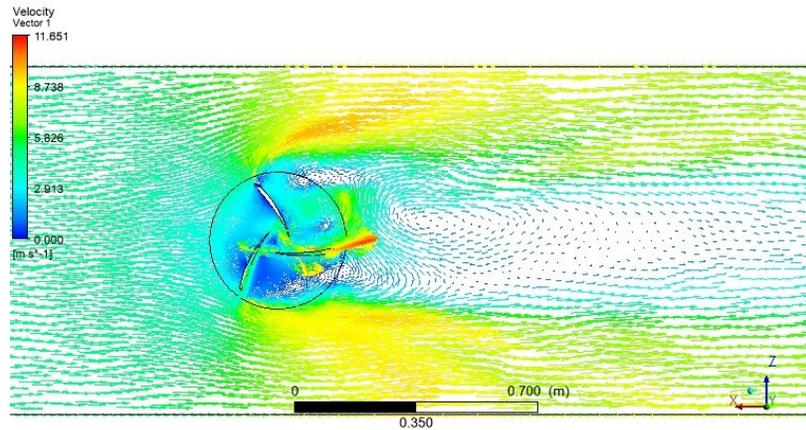


Figura 25. Representación vectorial del rotor savonius con alabe naca adaptado a 5m/s

E la figura 26 se logra apreciar la mayor zona de contacto en ambos lados, sin embargo se logra apreciar la diferencia de presiones.

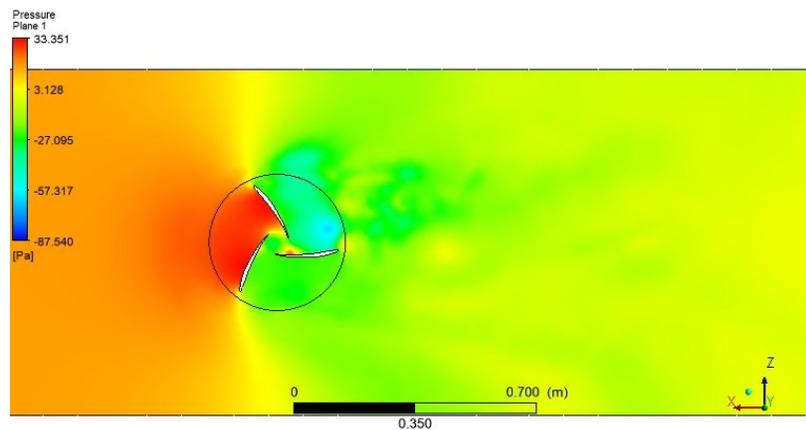


Figura 26. Zona de contacto y zona de vacío rotor savonius con alabe naca adaptado

#### 4.1 Representación gráfica de la velocidad angular de rotores (N1, N2, N3)

De acuerdo a las simulaciones realizadas en el software se obtienen las gráficas de velocidad angular con respecto al tiempo para los tres rotores de los que se hace referencia en el presente trabajo con una única velocidad de 5m/s.

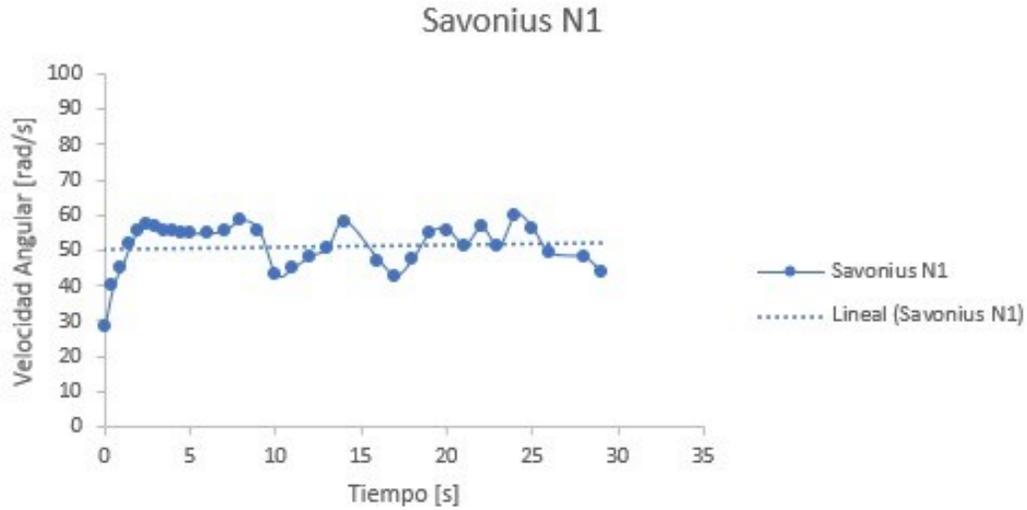


Figura 27: Velocidad angular - tiempo (N1)

En la figura (27) se muestran los distintos valores para la velocidad angular por unidad de tiempo para el rotor savonius N1 con respecto a una única velocidad de 5m/s en donde el pico más alto para este rotor se logra apreciar cerca a los 60 rad/s

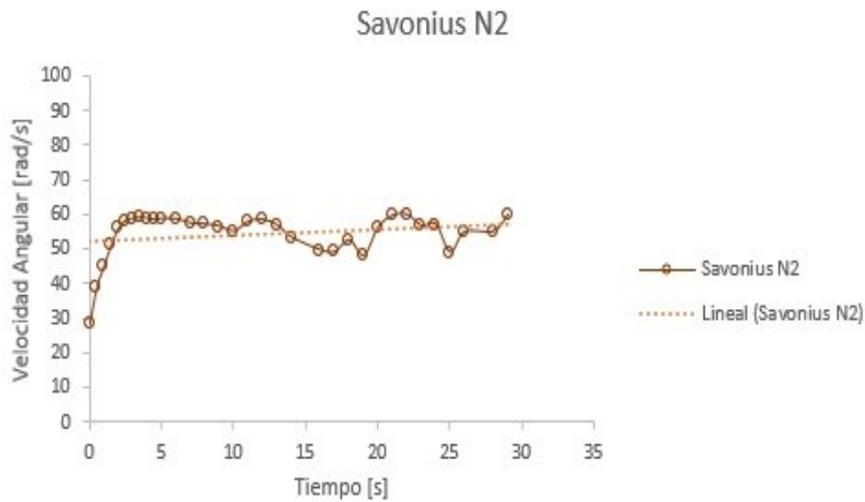


Figura 28: Velocidad angular - tiempo (N2)

Para el caso del rotor (N2) en la figura (28) se pueden observar los valores de la velocidad angular con respecto al tiempo, en donde se aprecia que su pico más alto se encuentra por debajo de los 60 rad/s y por encima de los 50 rad/s también para una única velocidad de 5m/s.

Las velocidades angulares para el rotor (N3), rotor en el cual se adaptó el perfil NACA 6506 a las palas del rotor savonius convencional se pueden observar en la figura (29), en donde se evidencia un mejor desempeño en términos de velocidad angular con respecto al tiempo en comparación con los dos rotores anteriores (N1 y N2), el pico más alto para este rotor se marca cerca a los 70 rad/s.

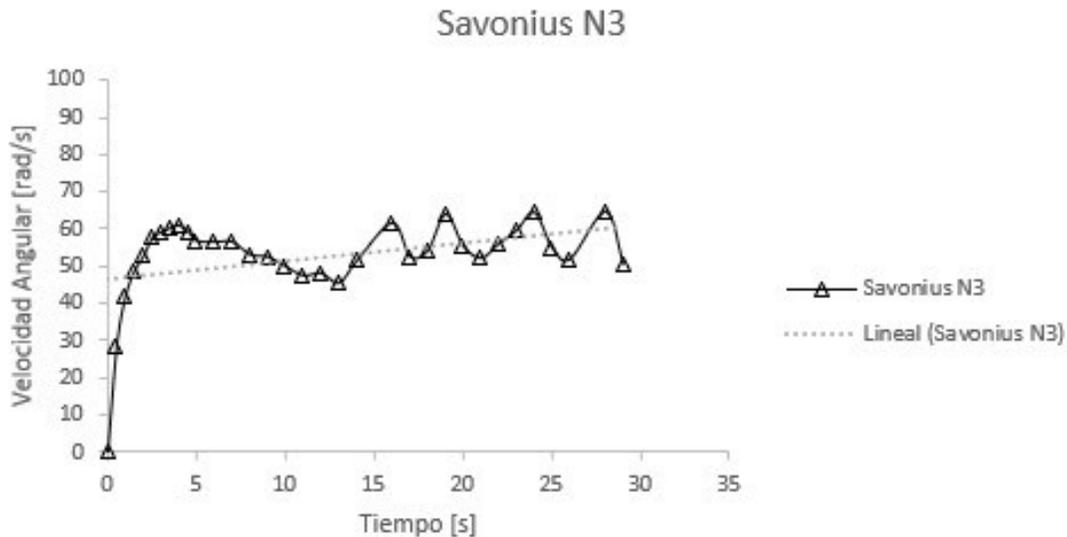


Figura 29: Velocidad angular - tiempo ( N3)

La figura (30) no es más que la combinación de las figuras (27), (28) y (29) de los rotores (N1, N2, N3) en donde se muestran las velocidades angulares de estos rotores con respecto al tiempo en un solo gráfico, manejando una única velocidad tangencial de 5m/s.

Se evidencia que las velocidades angulares para los tres rotores en mención presentan cierta similitud entre ellas. Sin embargo, si se realiza un enfoque más preciso es válido decir que la velocidad angular para el rotor N3 presenta un pico más alto, lo que indica un mayor desempeño en términos de velocidad angular, como ya antes se había mencionado y observado en la figura (29) para la velocidad angular de la configuración del rotor (N3) en el que se muestra que su pico más alto se encuentra cerca a los 70 rad/s, superando a los rotores (N1 y N2) en su desempeño de velocidad angular.

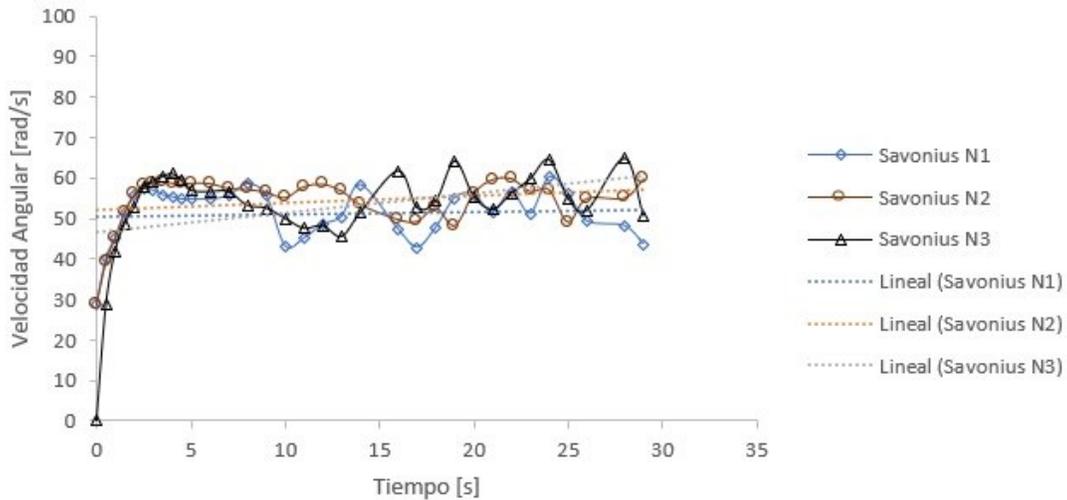


Figura 30: Velocidad angular - tiempo (N1 - N2 -N3)

## 4.2 Representación gráfica del torque para los rotores (N1, N2, N3)

Para el caso del torque en los rotores (N1, N2 y N3) se relaciona la misma simulación y se llegan a graficas de la misma manera como se hizo con la velocidad angular, solo que en este caso se toman los valores del torque y tiempo para una única velocidad de 5m/s.

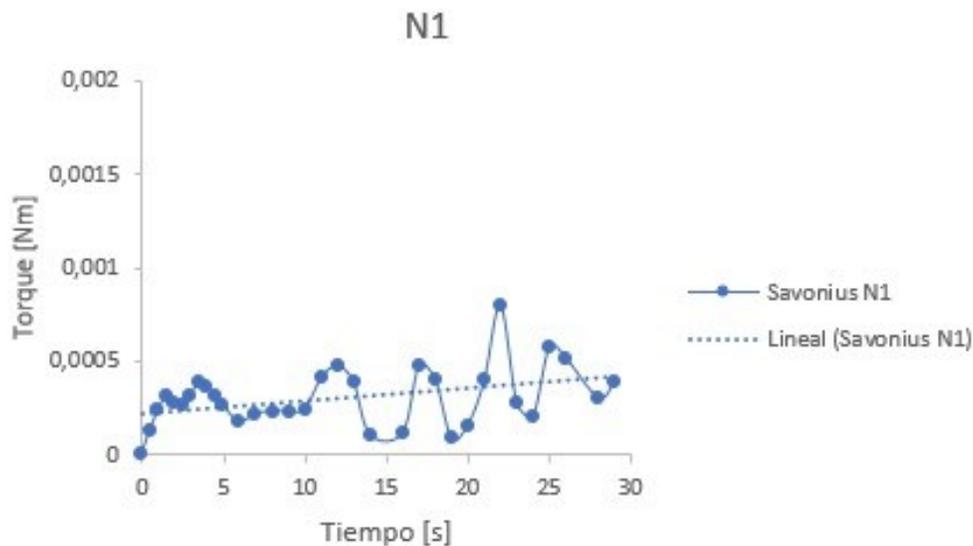


Figura 31: Torque - Tiempo (N1)

Para el rotor (N1) en la figura (31) en donde se relaciona la gráfica de torque por unidad de tiempo, se evidencia que su torque más alto se encuentra cerca de los 0,001 Nm.

En la figura (32) se muestran los valores del torque con respecto al tiempo para el rotor (N2) en donde se evidencia que el mayor valor del torque para N2 se encuentra por debajo 0.0005 Nm, dejándolo por debajo del valor del rotor N1 el cual se encuentra cerca de los 0.001 Nm como se observa en la figura (31).

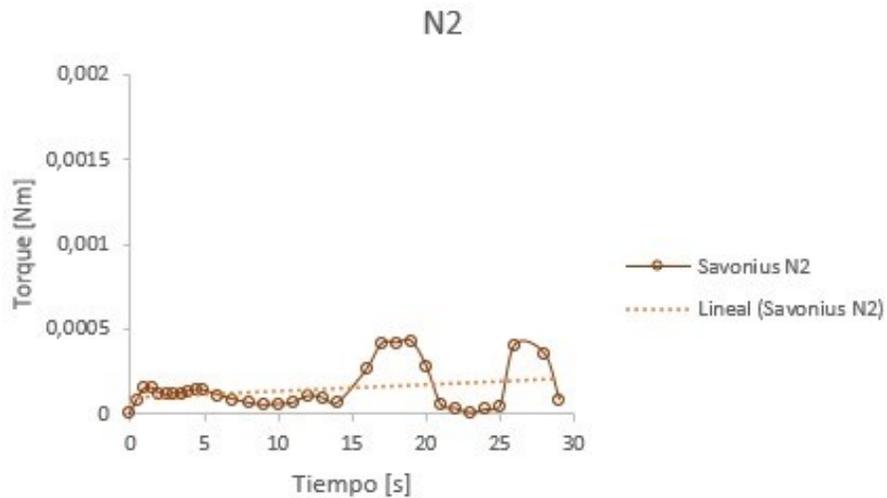


Figura 32. Torque - Tiempo (N2)

Para el caso del rotor (N3), los valores del torque con respecto al tiempo son mostrados en la figura (33), en la cual se puede apreciar que su valor más alto se encuentra por encima de los 0.001Nm, superando de esta forma a los rotores N2 y N3 los cuales sus valores de torque se encuentran por debajo de los 0.001Nm, como se evidencia en la figura (31) y (32).

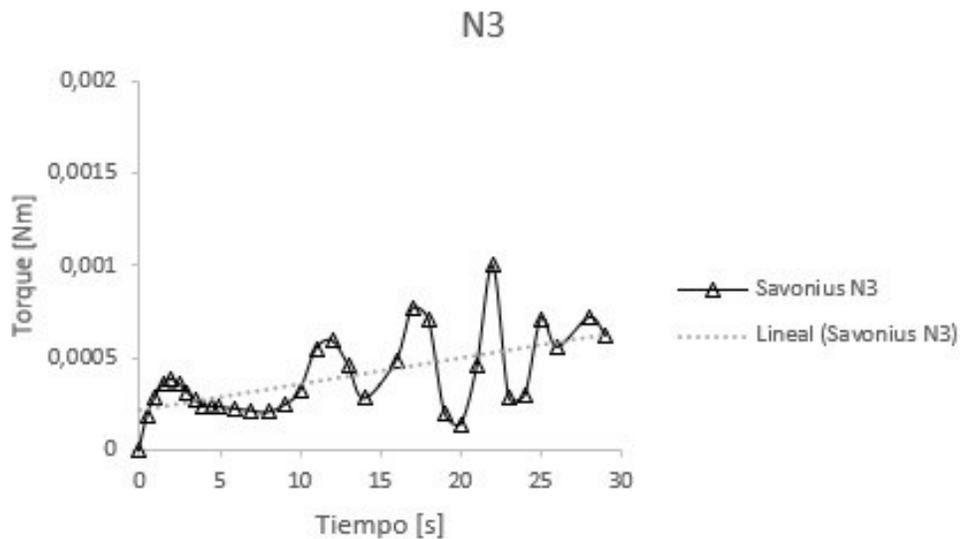


Figura 33. Torque - Tiempo (N3)

En la figura (34) se muestra una combinación de las figuras (31),(32) y (33) las cuales hacen referencia a los valores del torque con respecto al tiempo de los rotores N1, N2 y N3 y en donde se evidencia que una vez mas el rotor N3 muestra un mejor desempeño que los rotores N1 y N2 tal cual lo mostro para terminos de velocidad angular, solo que en este caso se muestra en terminos del valor del torque. Ver figura (34).

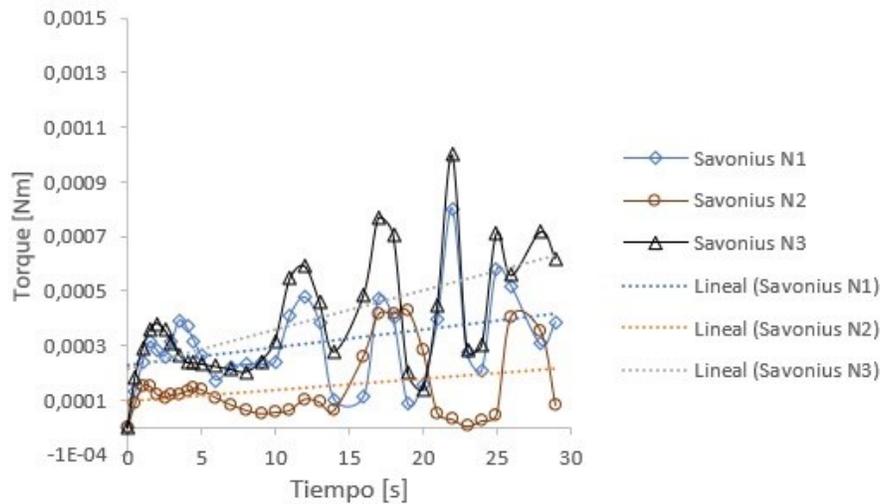


Figura 34: Torque - Tiempo (N1 - N2 - N3)

### 4.3 Representación gráfica de potencia para los rotores (N1, N2, N3)

De la misma manera como se muestran las gráficas de velocidad angular y torque con respecto al tiempo, también se obtienen graficas de la potencia por unidad de tiempo para los tres rotores en mención (N1 – N2 – N3) con una única velocidad tangencial de 5m/s.

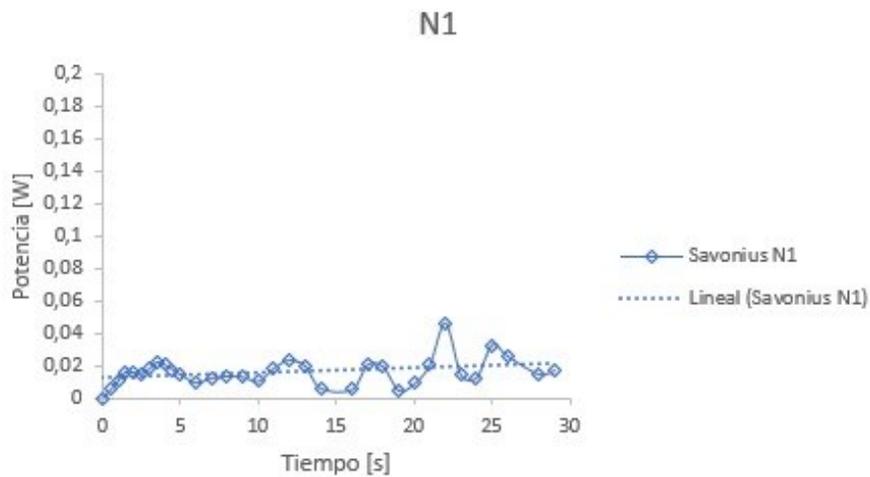


Figura 35: Potencia - Tiempo ( N1)

En la figura anterior (35) se muestra los valores de la potencia por unidad de tiempo para el rotor convencional savonius N1, en donde se observa de manera clara que el valor más alto de la potencia para este rotor se encuentra cerca de los 0.06 W y por encima de los 0.04W.

Para el rotor N2, los valores de la potencia con respecto al tiempo son mostrados en la figura (36), representación gráfica en la cual se evidencia que este rotor presenta una menor potencia que el rotor N1, y que su valor más alto se encuentra por encima de los 0.02W y por debajo de los 0.04W. Ver figura (36).

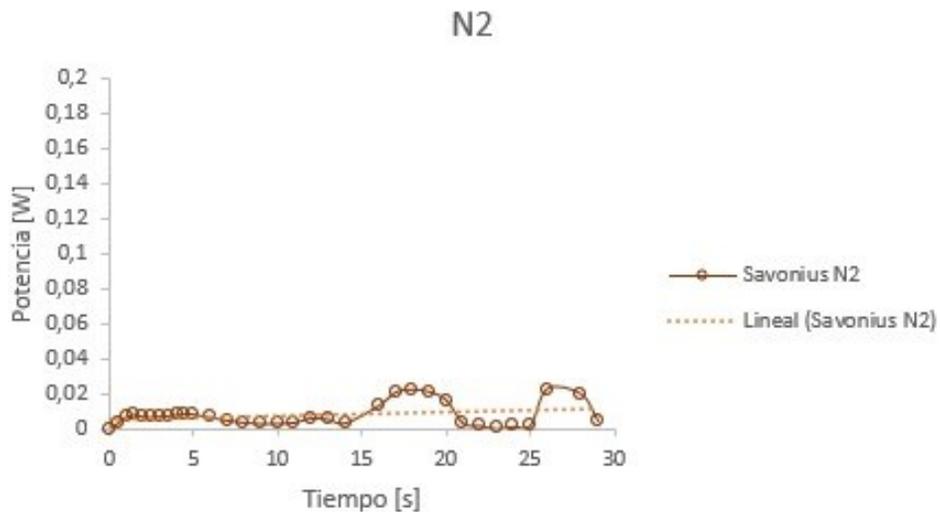


Figura 36: Potencia - Tiempo (N2)

Los valores de la potencia por unidad de tiempo de la nueva configuración del rotor savonius, rotor (N3) se encuentran por encima de 0.06 W, superando a los rotores N1 y N2 en su valor, lo que indica una mejor eficiencia en términos de potencia.

Ver figura (37)

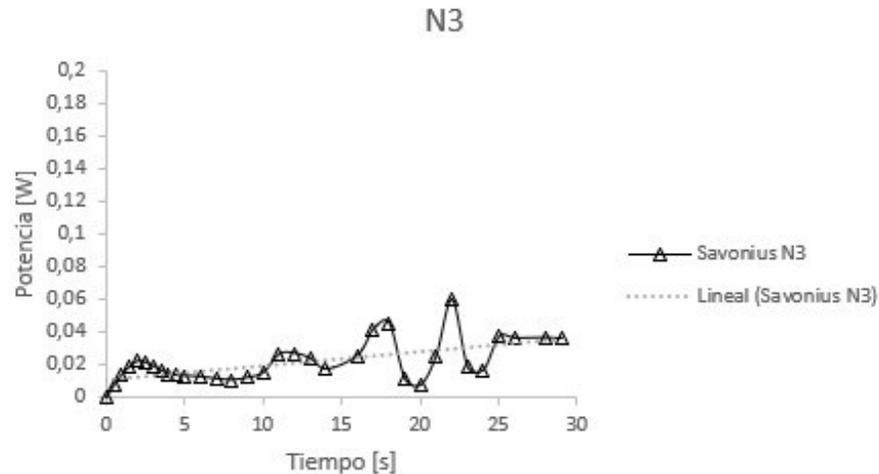


Figura 37: Potencia - Tiempo (N3)

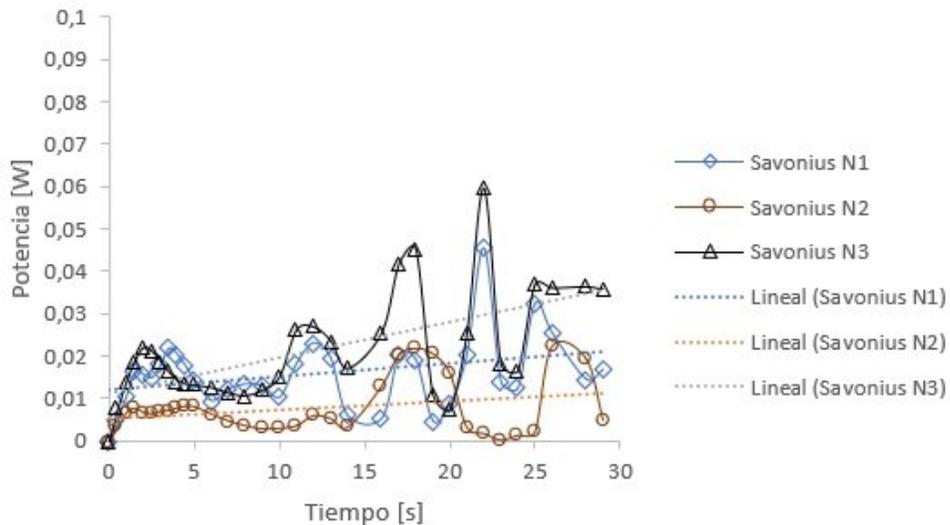


Figura 38: Potencia - Tiempo (N1 - N2- N3)

En la figura anterior, Fig. (38) se muestran las potencias de los tres rotores por unidad de tiempo, rotor N1, N2 y N3 grafico en el que se evidencia que el rotor N3, rotor con perfil NACA adaptado a las palas del savonius convencional muestra una vez más una mejor eficiencia que los rotores (N1, N2 Y N3), pero esta vez en términos de potencia como también mostro un mejor desempeño en términos de velocidad angular y torque.

## 4.4 Coeficiente de potencia $C_p$ y TSR para los rotores (N1, N2, N3).

Luego del procedimiento anterior y para el cálculo de la TSR y el  $C_p$ , se definen el siguiente juego de ecuaciones.

El coeficiente de potencia  $C_p$  es igual a la potencia que se obtiene de la simulación ( $P_s$ ) con respecto a la potencia máxima que se puede obtener del viento a través del aerogenerador ( $P_A$ ), en donde se conoce que la  $P_s$  (potencia simulada)

$$C_p = \frac{P_s}{P_A} \quad (32)$$

$$P_s = T \cdot w \quad (33)$$

$$P_A = \frac{\rho A \vec{v}^3}{2} \quad (34)$$

Pero para el caso de un aerogenerador es la potencia antes definida en la ecuación 31.

$$P = C_p \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (35)$$

$\rho =$  Densidad

$A =$  Area descrita por el aerogenerador

$v^3 =$  Velocidad del viento

En donde A sería el área de la sección transversal directa con respecto al viento debido a la altura del rotor savonius, dicha área será denominada área de ataque y se muestra en la siguiente figura.

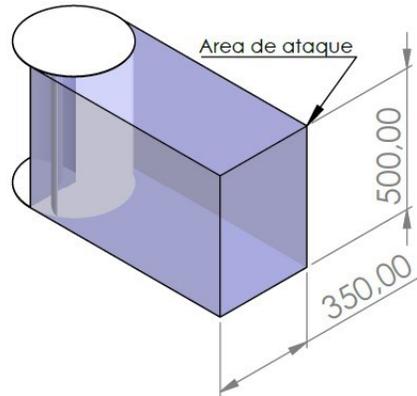


Figura 39. Rotor savonius con área de ataque

La ecuación 32 define el valor de la potencia máxima adquirida con respecto a la velocidad del viento, es decir si se simulan  $n$  velocidades del viento se obtendrían  $n$  potencias máximas calculadas y  $n$  potencias fijas calculadas de la simulación y si a su vez se evalúan estas potencias entre si se obtendrían  $n$   $C_p$ ; siendo  $n$  en este caso 5 debido a que en el presente proyecto se trabajaron con sus velocidades del viento distintas.

Se obtendrán 5 TSR por que se utilizaron 5 velocidades, para luego graficar  $C_p$  Vs TSR.

En la figura 40 se evidencia que la configuración del rotor savonius N3 presenta mejor desempeño en comparación con la configuración N2 y el rotor convencional N1, debido a que su potencia aumenta exponencialmente al acrecentar la velocidad, alcanzando un valor mayor a 0.05 W, así mismo se logra observar que la potencia registrada por la configuración de rotor savonius N2 es de 0.04 W por lo tanto tiene mejor desempeño en comparación con la del rotor convencional N1 cuya potencia es inferior a los dos prototipos propuestos

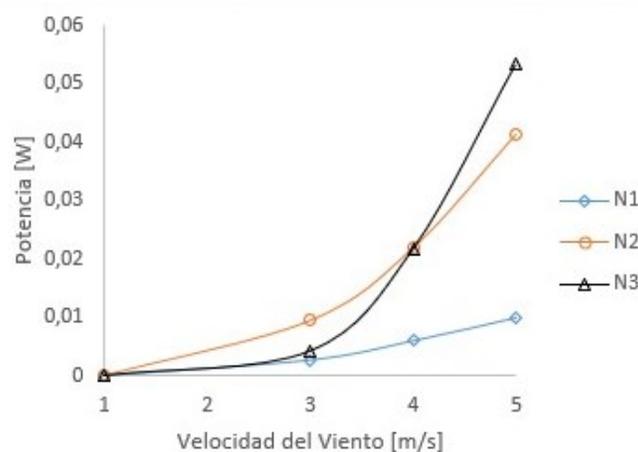


Figura 40. Potencia – velocidad del viento

Los valores de  $C_p$  se encuentran en función del TSR, la figura 41 describe los valores del  $C_p$  para el rotor N1 el cual aumenta linealmente y alcanza un valor de 0.0009 a una velocidad de 1.94.

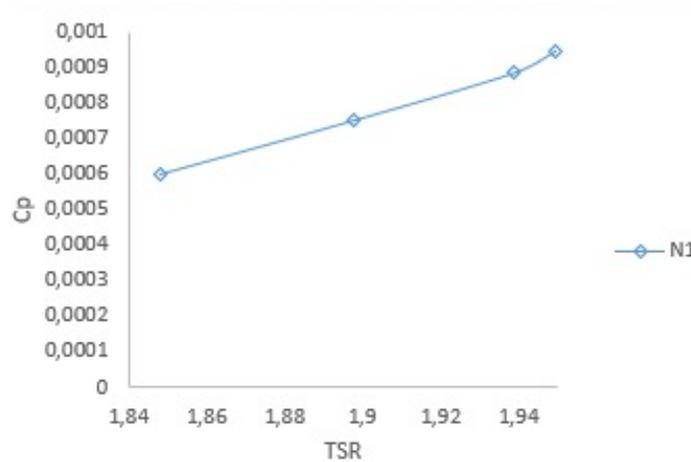


Figura 41. TSR –  $C_p$  N1

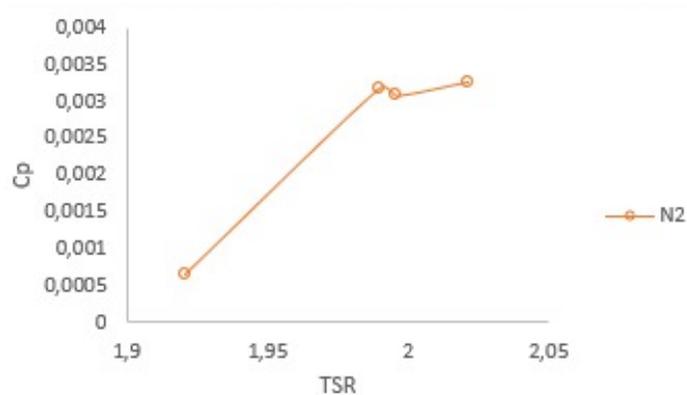


Figura 42. TSR –  $C_p$  N2

Para el rotor N2 la figura 42 describe que el valor del  $C_p$  aumenta linealmente, sin embargo, se decrece en un intervalo dado para finalmente alcanzar su máximo valor en un intervalo de velocidad de 2 a 2.05

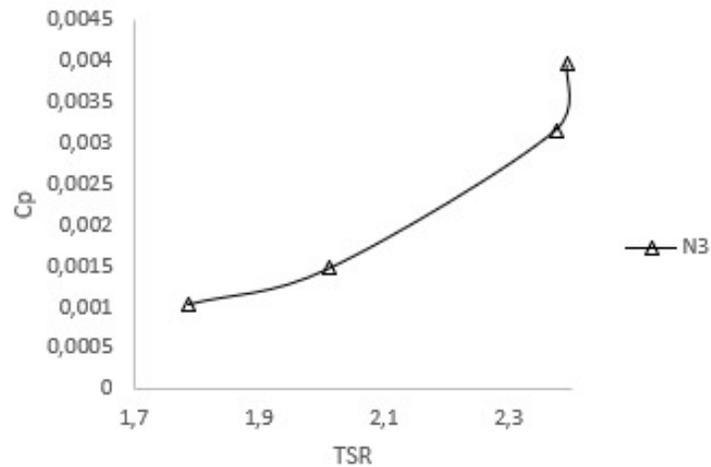


Figura 43. TSR – Cp N3

El rotor N3 alcanza su valor máximo de 2.3 en adelante, en la figura 44 se evidencia que el valor del Cp es proporcional al TSR

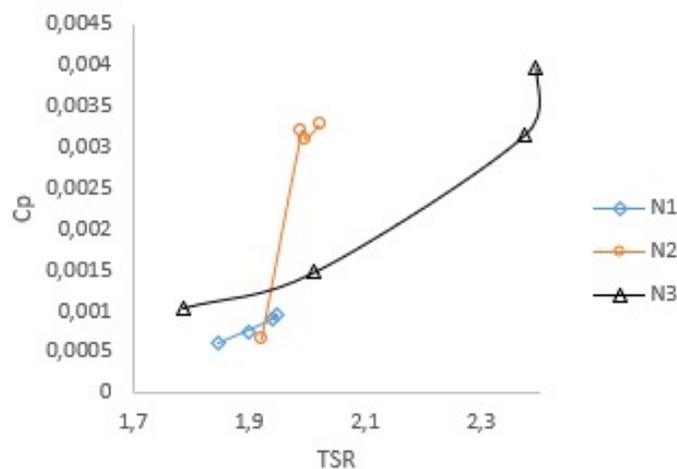


Figura 44. Cp - TSR (N1 - N2 - N3)

En la figura 44 se evidencia que el valor máximo del Cp es registrado por el rotor N3, con un aumento notorio de 0.001 a 0.004. El rotor N2 registra un aumento instantáneo su máximo valor en un intervalo de 1.9 a 2.1 de TSR sin embargo, su valor es inferior en referencia al valor registrado por el rotor N3. El rotor N1 registra el muy poca variación, el valor del Cp registrado es de 0.001 siendo el valor más bajo.

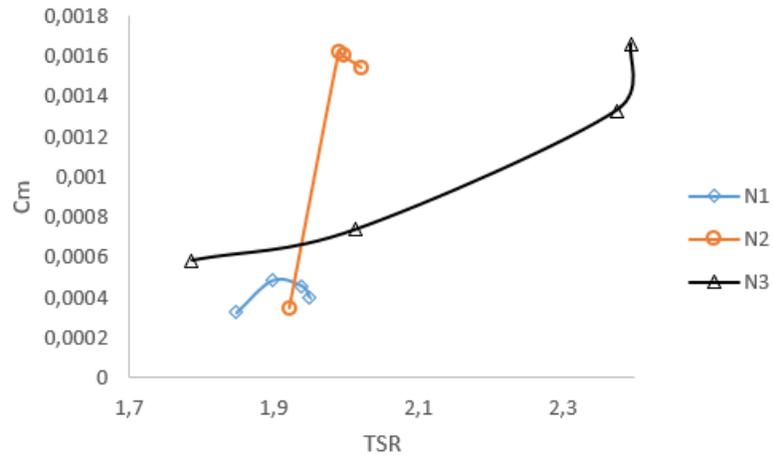


Figura 45. Cm - TSR (N1 - N2 - N3)

Al igual que en la figura 44 donde se obtuvo el coeficiente de potencia para los tres diseños simulados, en la figura 45 se muestra el coeficiente de momento o par que evidencia la tendencia del comportamiento de la anterior figura mostrándose que para el rotor N3 el valor máximo del Cm es registrado por el rotor N3, con un aumento notorio de 0.0006 a 0.0018. El rotor N2 registra un aumento instantáneo su máximo valor en un intervalo de 0.0004 a 0.0017.



## **5. Conclusiones y recomendaciones**

### **5.1 Conclusiones**

Se desarrolló un análisis computacional a fin de analizar el efecto sobre el rendimiento de un rotor savonius adaptando un perfil NACA. El perfil NACA seleccionado fue el 6506 de la familia de cuatro dígitos, este perfil cuenta con una alta relación de sustentación además posee la concavidad recalcada en el alabe del rotor savonius, es por ello que resulto ideal al adaptarlo al alabe del rotor Savonius.

Se realizó el diseño del rotor Savonius propuesto teniendo en cuenta el modelo propuesto por (Pulfer et al., 2017) el desarrollo del modelado CAD y simulación por medio de software SFD. Durante el proceso se logró apreciar que el rotor savonius con perfil Naca adaptado no contaba con la concavidad necesaria, es por ello que se procedió a implementar un perfil NACA adaptado, en donde se pronunciara mucho la concavidad del perfil NACA.

Se realizó la comparación de los prototipos propuestos y del rotor savonius convencional, los cuales permitieron concluir que los valores de  $C_p$  aumentan para el prototipo N3 gracias a que los valores obtenidos de TSR aumentan a 2.37 a una velocidad de viento de 5 m/s para un coeficiente de desempeño de 0.004 en comparación al rotor savonius de alabe convencional que alcanza un TSR de 1.97 a una velocidad de viento de 5m/s con un coeficiente de desempeño de 0.0035.

Este tipo de investigación, pueden llegar a ser ideas viables en términos de generación de energías limpias.



## Bibliografía

- Cárdenas, R. D. (2015). Generador eólico como proyecto de intercambio cultural y tecnológico entre Flathead Valley Community College de Montana y el Centro de Automatización Industrial del SENA. *Vector*, 10, 80–88.
- De Lellis, M., Reginatto, R., Saraiva, R., & Trofino, A. (2018). The Betz limit applied to Airborne Wind Energy. *Renewable Energy*, 127, 32–40.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.034>
- Harpe, S. E., Zohrabi, M., Barkaoui, K., Lozano, L. M., García-Cueto, E., Muñiz, J., Menold, N., Kaczmirek, L., Lenzner, T., Neusar, A., Martin-Raugh, M., Tannenbaum, R. J., Tocci, C. M., Reese, C., Reid, R., Dupaul, G. J., Power, T. J., Anastopoulos, A. D., Rogers-Adkinson, D., ... Schillewaert, N. (2015). No Title. *Renewable Energy*, 80, 1–10.  
<https://doi.org/10.5897/ERR2015>
- Hidalgo, I. R., Rojas, I. O., Riano, A. B., Morales, C. C., & Arias, A. R. (2018). Evaluation of a Geometric Modification in Savonius Rotor Using CFD Evaluación de Modificación Geométrica en Rotor Savonius Usando CFD. *2018 IEEE ANDESCON, ANDESCON 2018 - Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ANDESCON.2018.8564608>
- Kothe, L. B., Möller, S. V., & Petry, A. P. (2020). Numerical and experimental study of a helical Savonius wind turbine and a comparison with a two-stage Savonius turbine. *Renewable Energy*, 148, 627–638. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.151>
- Mahmoud, N. H. (2012). An experimental study on improvement of Savonius rotor performance. *Alexandria Engineering Journal*, 51(1), 19–25.  
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.07.003>
- Paz, S. P. (2013). El perfil alar y su nomenclatura NACA. *Ciencia y Poder Aéreo*, 8(1), 26–32.  
<https://www.publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/article/view/4%0Ahttps://www.publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/article/download/4/4%0Ahttps://www.publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/article/view/4/106>
- Pulfer, J., Meza, W., & Mitjans, F. (2017). *eólicos a eje vertical y de arrastre diferencial*

*Energy efficiency assessment of four designs of vertical axis and drag differential wind turbines.* xx(x), 32.

- Saad, A. S., El-Sharkawy, I. I., Ookawara, S., & Ahmed, M. (2020). Performance enhancement of twisted-bladed Savonius vertical axis wind turbines. *Energy Conversion and Management*, 209(March).  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112673>
- Troncoso, C. (2014). *Diseño de un rotor hidrocínético usando perfiles NACA y NREL*.
- Zemamou, A. M. (2017). ScienceDirect ScienceDirect Review of savonius wind turbine design and performance Review of savonius wind turbine design and performance \*, of the feasibility using the temperature function for a district heat demand forecast. *Energy Procedia*, 141, 383–388. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.047>
- Cárdenas, R. D. (2015). Generador eólico como proyecto de intercambio cultural y tecnológico entre Flathead Valley Community College de Montana y el Centro de Automatización Industrial del SENA. *Vector*, 10, 80–88.
- De Lellis, M., Reginatto, R., Saraiva, R., & Trofino, A. (2018). The Betz limit applied to Airborne Wind Energy. *Renewable Energy*, 127, 32–40.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.034>
- Harpe, S. E., Zohrabi, M., Barkaoui, K., Lozano, L. M., García-Cueto, E., Muñiz, J., Menold, N., Kaczmirek, L., Lenzner, T., Neusar, A., Martin-Raugh, M., Tannenbaum, R. J., Tocci, C. M., Reese, C., Reid, R., Dupaul, G. J., Power, T. J., Anastopoulos, A. D., Rogers-Adkinson, D., ... Schillewaert, N. (2015). No Title. *IEEE Access*, 3, 1–12. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2491112>
- Hidalgo, I. R., Rojas, I. O., Riano, A. B., Morales, C. C., & Arias, A. R. (2018). Evaluation of a Geometric Modification in Savonius Rotor Using CFD Evaluación de Modificación Geométrica en Rotor Savonius Usando CFD. *2018 IEEE ANDESCON, ANDESCON 2018 - Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ANDESCON.2018.8564608>
- Kothe, L. B., Möller, S. V., & Petry, A. P. (2020). Numerical and experimental study of a helical Savonius wind turbine and a comparison with a two-stage Savonius turbine. *Renewable Energy*, 148, 627–638. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.151>
- Mahmoud, N. H. (2012). An experimental study on improvement of Savonius rotor performance. *Alexandria Engineering Journal*, 51(1), 19–25.  
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.07.003>
- Paz, S. P. (2013). El perfil alar y su nomenclatura NACA. *Ciencia y Poder Aéreo*, 8(1), 26–

32.

<https://www.publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/article/view/4%0Ahttps://www.publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/article/download/4/4%0Ahttps://www.publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/article/view/4/106>

Pulfer, J., Meza, W., & Mitjans, F. (2017). *eólicos a eje vertical y de arrastre diferencial Energy efficiency assessment of four designs of vertical axis and drag differential wind turbines*. *xx(x)*, 32.

Saad, A. S., El-Sharkawy, I. I., Ookawara, S., & Ahmed, M. (2020). Performance enhancement of twisted-bladed Savonius vertical axis wind turbines. *Energy Conversion and Management*, 209(March).

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112673>

Troncoso, C. (2014). *Diseño de un rotor hidrocínético usando perfiles NACA y NREL*.

Zemamou, A. M. (2017). ScienceDirect ScienceDirect Review of savonius wind turbine design and performance Review of savonius wind turbine design and performance \*, of the feasibility using the temperature function for a district heat demand forecast. *Energy Procedia*, 141, 383–388. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.047>