

**Propuesta de un aerogenerador tipo savonius evaluando cambios  
geométricos para mejora de su eficiencia.**

Victor Andres Escobar, Juan David Benavidez, Diego Andres Quintero

Facultad de ingeniería

Programa de ingeniería en energías

2025

Director Iván Darío Ruiz

Modalidad: Articulo

# Propuesta de un aerogenerador tipo savonius evaluando cambios geométricos para mejora de su eficiencia

Juan David Benavidez<sup>1</sup>  
Juan.benavidez03@usc.edu.co

Víctor Andres Escobar<sup>1</sup>  
Victor.escobar06@usc.edu.co

Diego Andres Quintero<sup>1</sup>  
Diego.quintero06@usc.edu.co

Iván Darío Ruiz Hidalgo<sup>1</sup>  
ivan.ruiz01@usc.edu.co

Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Programa de ingeniería en energías. (1)

## Resumen

El estudio ha logrado ver el potencial de generación de energía en los aerogeneradores con estructura vertical en su eje, apreciando así mismo la oportunidad de poder maximizar su baja eficiencia aplicando diferentes cambios en su composición estructural alterando o añadiendo nueva geometría en el rotor de serie o estándar. Para este caso como lo es el Rotor Savonius de tipo eje vertical, que, si bien son fáciles de construir, poseen bajas eficiencias. Con el objetivo de mejorar la eficiencia de un rotor Savonius convencional, el presente trabajo propone una modificación geométrica sobre las palas intentando aprovechar mejor la energía cinética proveniente del viento. Para probar el desempeño de la nueva geometría propuesta, se hizo uso de un ambiente de simulación utilizando ANSYS fluent mediante un dominio computacional 2D. Posteriormente se fabricó el rotor propuesto a escala usando impresión 3D y se probó su desempeño en el túnel de viento del Laboratorio de Energías de la Universidad Santiago de Cali. Se evaluaron valores de TSR entre 0.56 a 0.76 y se obtuvieron valores de  $C_p$  alrededor de 0.21 en promedio, presentando una mejora de 6% respecto a al rotor convencional. Si bien las simulaciones computacionales muestran una mejora en el desempeño, existieron algunas discrepancias con la comprobación experimental

*Palabras Clave:* Software ANSYS, Rotor Savonius, CFD, Túnel de Viento, Laboratorio de Energías Inteligente, Coeficiente de potencia, Coeficiente de torque, Cambios geométricos, RPM, turbina eje vertical, K-w SST.

## Abstract

This study has identified the energy generation potential of vertical-axis wind turbines (VAWTs), highlighting the opportunity to enhance their inherently low efficiency through structural modifications, specifically by altering or augmenting the rotor's baseline geometry. In particular, the Savonius rotor—characterized by its vertical-axis configuration and ease of fabrication yet known for its limited aerodynamic efficiency—serves as the focus of this investigation. With the objective of improving the performance of a conventional Savonius rotor, this work proposes a geometric modification to the blade profiles aimed at optimizing the capture of wind-induced kinetic energy. To evaluate the aerodynamic performance of the modified design, numerical simulations were conducted in a two-dimensional computational domain using ANSYS Fluent. The proposed rotor was subsequently fabricated at scale via additive manufacturing (3D printing) and experimentally assessed in the wind tunnel facility of the Energy Laboratory at Universidad Santiago de Cali. Tip Speed Ratio (TSR) values ranging from 0.56 to 0.76 were investigated, yielding power coefficient ( $C_p$ ) values averaging approximately 0.21, which represents a 6% enhancement relative to the baseline rotor. While numerical simulations indicated improved aerodynamic performance, certain discrepancies were observed during experimental validation.

*Keywords:* ANSYS software, Savonius rotor, CFD, wind tunnel, Intelligent Energy Laboratory, power coefficient, torque coefficient, geometric modifications.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el campo del desarrollo de la generación de energía eléctrica a partir de la energía eólica, se han explorado diversas alternativas para aprovechar la energía cinética del viento, entre las que destacan varias configuraciones de aerogeneradores

de eje vertical. Específicamente, el rotor tipo Darrieus, como se analizó en el estudio de Shen et al. (2024), se presenta como una opción sobresaliente en escenarios que permiten una captura eficiente del momento cinético del viento. De igual manera, la investigación de Sarmiento-Laurel et al. (Sarmiento-Laurel et al., 2025) demostró la capacidad de los rotores helicoidales para lograr un aprovechamiento óptimo en condiciones de baja velocidad del viento, facilitando así la conversión de esta energía en potencia eléctrica. Sin embargo, en los últimos años se ha evidenciado una creciente preferencia por el rotor de eje vertical tipo Savonius, tal como lo señala el estudio de Shamsuddin et al. (Shamsuddin et al., 2022).

El análisis y la investigación, tanto teóricos como prácticos, orientados a maximizar la eficiencia de los rotores Savonius de eje vertical, han revelado diversas oportunidades de mejora. Este tipo de rotores, debido a su facilidad de construcción, permiten realizar modificaciones geométricas buscando mejorar parámetros clave como el coeficiente de potencia ( $C_p$ ) y el coeficiente de torque ( $C_t$ ). En este sentido, el estudio de (Haddad et al., 2021), demostró que, mediante ajustes geométricos en el diseño del rotor, se logró incrementar el rendimiento de la turbina hasta en un 24,24 % en su punto óptimo, correspondiente a una relación de velocidad de punta (TSR) de 0,75. Estas mejoras en la eficiencia tienen un alto potencial de aplicación en regiones con acceso limitado a la red eléctrica, contribuyendo así al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible 7 propuesto por la ONU (Anlló, 2022).

Se ha logrado una mayor estabilidad en el tiempo de operación gracias a los estudios en los que se han implementado modificaciones geométricas en los rotores Savonius, como lo evidencia en el estudio de (Abdel-razak et al., 2025). Para llevar a cabo estas investigaciones, se ha empleado una metodología basada en la Mecánica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés), permitiendo simular el comportamiento de los rotores propuestos con un alto grado de fidelidad. Se han mostrado índices de similitud aceptables entre esta técnica y los datos experimentales, tal como lo demuestra el estudio de [Artículo], donde la aplicación de CFD resultó ser una herramienta eficaz para la validación y optimización de diseños.

Con base en lo expuesto anteriormente, se propondrá la implementación de diferentes modificaciones geométricas en la estructura del rotor Savonius. El rotor será probado tanto mediante análisis de Mecánica Computacional de Fluidos como experimentalmente, utilizando el túnel de viento disponible en el laboratorio de Energías de la Universidad Santiago de Cali. Apoyado en la revisión de la literatura existente, se buscará desarrollar un prototipo mejorado que desafíe las limitaciones del diseño convencional y, al mismo tiempo, supere los valores estándar del Coeficiente de Potencia ( $C_p$ ) y del Coeficiente de Momento ( $C_m$ ). Estos indicadores permitirán determinar si las modificaciones propuestas resultan en una mejora significativa en la eficiencia del rotor evaluado en el presente estudio.

### Nomenclatura

$C_p$  Coeficiente de potencia

$C_m$  Coeficiente de momento

D diámetro turbina de rotor

D diámetro palas rotor

Z grosor palas rotor

CFD mecánica computacional de fluidos

RPM revoluciones por minuto

TSR tip speed ratio

VAWT turbina de eje vertical

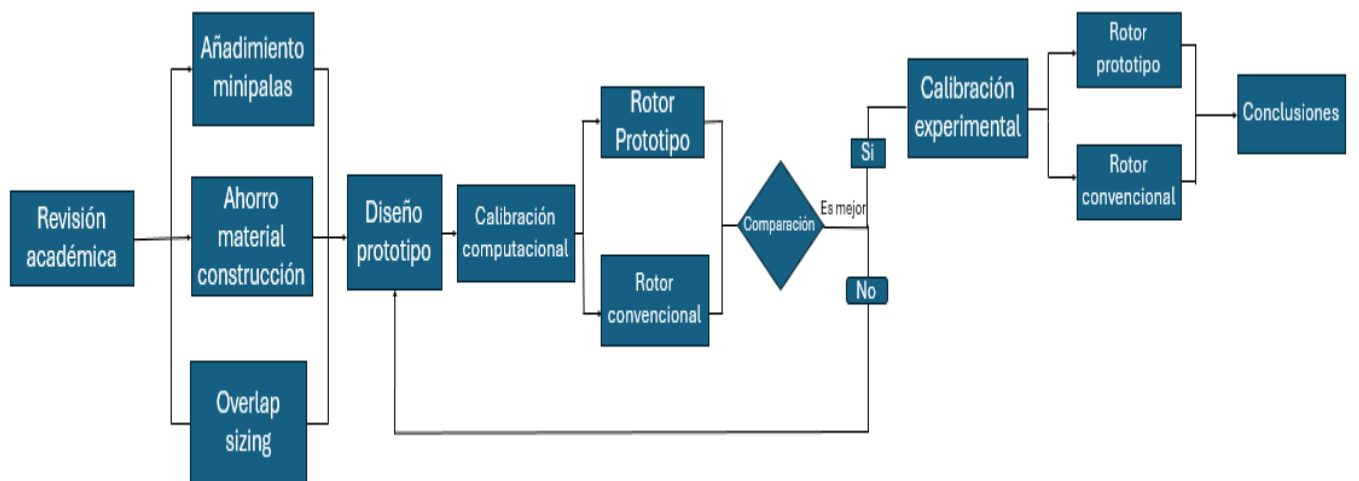
K-w SST Transporte del esfuerzo cortante de Meter

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS/METODOLOGIA

La metodología empleada en este estudio partió de una revisión de la literatura académica sobre mejoras del rotor Savonius. A partir de esta revisión, se propusieron seis configuraciones con potencial para mejorar el rendimiento respecto al diseño convencional. Estas seis configuraciones fueron evaluadas inicialmente mediante CFD para analizar su comportamiento aerodinámico y estimar su coeficiente de potencia. La configuración que demostró la mayor eficiencia en las simulaciones CFD fue seleccionada para la siguiente fase.

Posteriormente, se construyó un prototipo físico de la configuración más eficiente. Este prototipo fue sometido a pruebas experimentales en un túnel de viento para validar los resultados de las simulaciones y obtener datos de rendimiento en condiciones controladas. Finalmente, se realizó una comparación directa del desempeño de este prototipo mejorado con el de un rotor Savonius convencional bajo las mismas condiciones de prueba. El proceso metodológico completo se resume gráficamente en la Ilustración 1.

*ilustración 1 – Diagrama Metodología.*



Fuente - elaboración propia.

### 2.1 REVISION LITERATURA

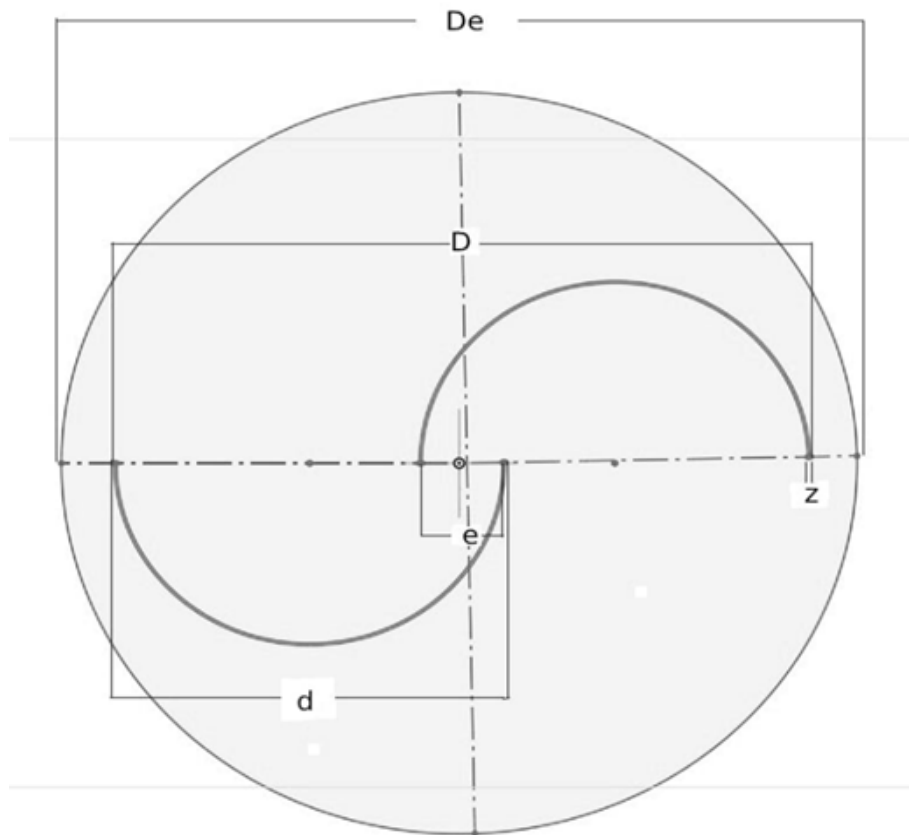
En la investigación sobre el rotor Savonius convencional, se observó que la mayoría de los estudios recientes proponen modificaciones geométricas para incrementar su eficiencia. Por ejemplo, (Singh et al., 2024) desarrollaron un modelo de dos niveles, logrando un aumento del coeficiente de potencia ( $C_p$ ) del 23% a una velocidad de viento de 7 m/s. De manera similar, (Wang et al., 2024) analizaron distintas configuraciones en los extremos de las aspas y determinaron que las variaciones en esta zona influyen significativamente en el rendimiento del rotor, siendo la geometría en "S dividida" la base más recurrente.

Asimismo, estudios como el de (Yigit, 2024) demuestran que alteraciones estructurales en el diseño pueden elevar el  $C_p$  hasta 0.10. Este trabajo, al igual que otras investigaciones (Rizk & Nasr, 2023a), opta por incorporar palas adicionales al rotor convencional. En el caso de (Rizk & Nasr, 2023b), la adición de pequeñas palas secundarias permitió mejorar el coeficiente de momento en un 7.8% en comparación con el diseño original.

### 2.1.1 Propuestas geométricas

Se tomaron en cuenta estas tendencias que evidenciaron mejoras en la eficiencia del rotor Savonius convencional para el diseño y evaluación de los prototipos que se analizaron en este estudio partiendo del siguiente modelo base.

*ilustración 2 - Estructura base*



Fuente – Elaboración propia

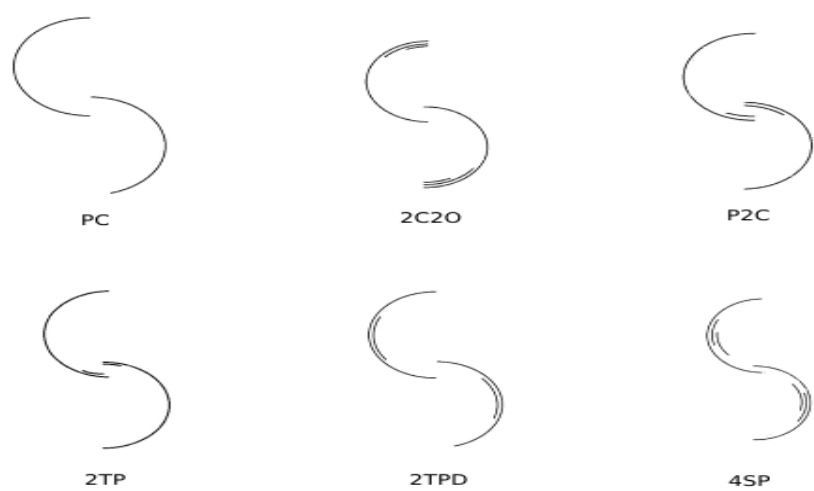
Tabla 1

Dimensiones e identificación del rotor tomando en cuenta la ilustración 1. Los modelos fueron realizados tomando en cuenta las mejoras que se evidenciaron en la revisión académica y con el objetivo del ahorro de material.

| Geometría                         | ID   | Tipo turbina |
|-----------------------------------|------|--------------|
| Palas convencionales              | PC   | Savonius     |
| Dos cuartos y dos octavos de pala | 2C2O | Savonius     |
| Palas centrales                   | P2C  | Savonius     |
| Dos tercios de palas              | 2TP  | Savonius     |
| Dos tercios de palas desfasados   | 2TPD | Savonius     |
| Cuatro sextos de pala             | 4SP  | Savonius     |

Las medidas estructurales trabajadas en metros y en las que se basaron todos los prototipos propuestos tomando en cuenta la ilustración 2 son las siguientes: Diámetro (D): 0.925 m, Diámetro del final de las palas (De): 1.0175 m, Espesor palas (z): 0.002, Acorde longitud de la pala (d): 0.5, Overlap (e): 0.15.

ilustración 3 – Prototipos Propuestos.



Fuente- Elaboración propia

Ilustración 2 - Configuraciones propuestas

En los prototipos mostrados en la Ilustración 2 se consideraron diferentes modelos del rotor Savonius de eje vertical, los cuales fueron evaluados y sometidos a pruebas preliminares. Este tipo de rotor se caracteriza por contar con dos palas dispuestas con una separación específica entre ellas. A partir del análisis práctico de estos modelos, y en base a fundamentos teóricos, se descartaron varias configuraciones iniciales, lo que permitió avanzar hacia el diseño del modelo final 4SP. Este último demostró, mediante simulaciones virtuales, un rendimiento óptimo tanto en el coeficiente de potencia como en el torque, superando al modelo convencional en ambos aspectos.

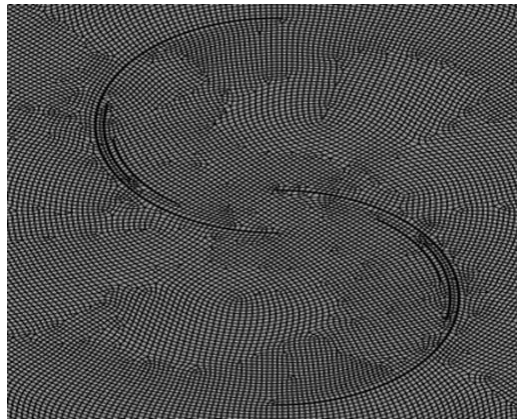
## 2.2 CALIBRACION MODELO COMPUTACIONAL

Para la calibración de los modelos propuestos se hizo uso de la mecánica computacional de fluidos, la cual ha demostrado una aproximación decente con respecto a los resultados prácticos obtenidos en la literatura como es demostrado en el artículo de (Ghafoorian et al., 2025), donde los resultados de CFD existentes tuvieron una concordancia aceptable con los resultados experimentales.

### 2.2.1 ENMALLADO

Se realizó el modelo de los prototipos mediante el uso del software ANSYS Workbench, donde se llevó las dimensiones de estos a un entorno en 2D como es usualmente aplicado en la literatura a la hora de tomar en cuenta el recurso computacional disponible sin una variación grave en los resultados teóricos, como es el caso de la investigación realizada por (Chegini et al., 2023).

*Ilustración 4 - Proceso de enmallado*

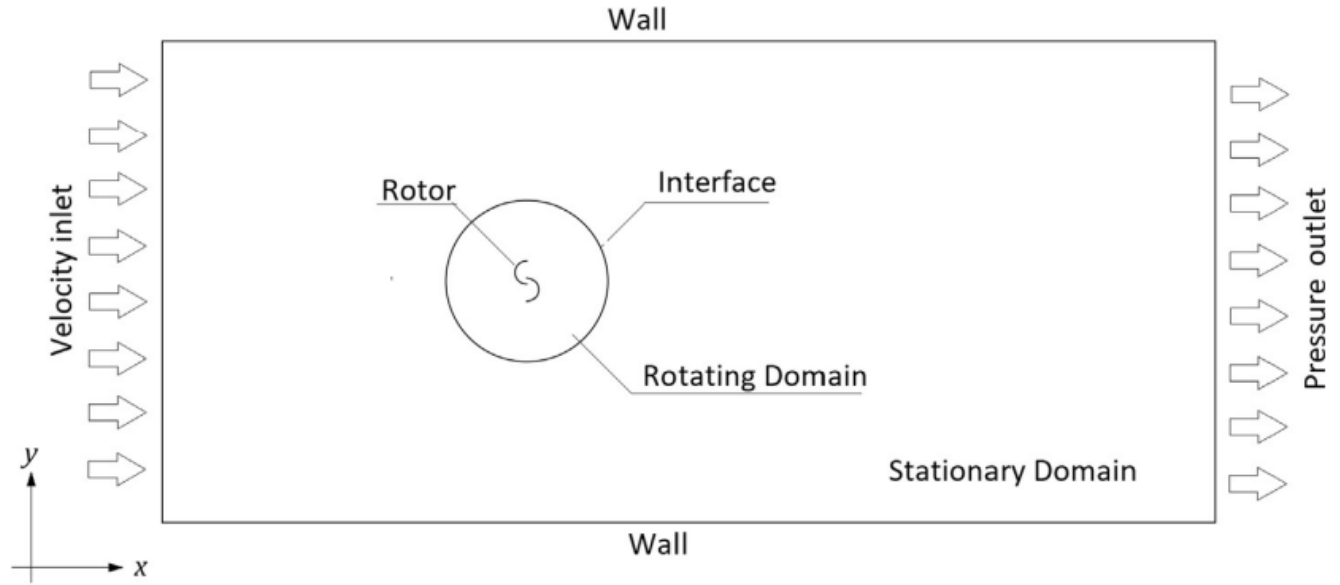


Fuente- Elaboración propia

Dado el dominio computacional definido y evaluando un estado de transición utilizando un modelo de turbulencia  $k - \omega$ , las condiciones de frontera utilizadas en este estudio fueron basadas en el artículo de (Ostos et al., 2019). Se muestran en la ilustración 5.

- Velocidad de entrada constante de 7m/s con dirección constante en el eje X.
- Presión estática de salida, la presión atmosférica relativa establecida en 0 Pa.
- Se impone una condición de pared estacionaria para la parte superior e inferior del dominio, donde se estableció el esfuerzo cortante como cero (0)
- No se seleccionaron condiciones de pared para la superficie en los alabes
- Dado que es una simulación 2D, la temperatura y densidad del flujo fueron irrelevantes. También se descartó el flujo vertical durante la simulación.

### *Ilustración 5 – Condiciones de borde*



Fuente - (Ostos et al., 2019)

El rotor se hizo girar durante la simulación para poder evaluar los diferentes valores de TSR propuestos utilizando una velocidad de giro de 1° por cada ‘time step’, permitiendo que el programa logre resolver adecuadamente el comportamiento de los efectos viscosos del aire alrededor de las palas, El software resuelve internamente las ecuaciones de Navier-Stokes utilizando un modelo numérico de aproximación denominado el método de volúmenes finitos.

Las ecuaciones que se resolvieron mediante este método fueron principalmente las siguientes:

**Ecuación de conservación de masa (Ecuación 1):**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

Donde  $\rho$  representa la densidad,  $t$  representa el tiempo,  $\nabla$  la divergencia,  $\mathbf{v}$  la velocidad del flujo. Esta ecuación permitió analizar como el aire se mueve alrededor de las turbinas eólicas, y ayuda a predecir como el aire se mueve en los diferentes puntos del sistema (Guo et al., 2025)

**Ecuación de conservación en cantidad de movimiento (Ecuación 2):**

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} + \nabla \cdot \mathbf{\tau} + \nabla p - \rho \mathbf{g} = 0$$

Donde  $\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}$  describe la acumulación,  $\rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}$  describe la advección,  $\nabla \cdot \mathbf{\tau}$  el transporte viscoso,  $\nabla p$  el gradiente de presión y  $\rho \mathbf{g}$  la energía potencial, que permitió determinar las fuerzas que el viento ejerce sobre las palas del rotor y estimar el torque generado (Laubscher & Rousseau, 2022).

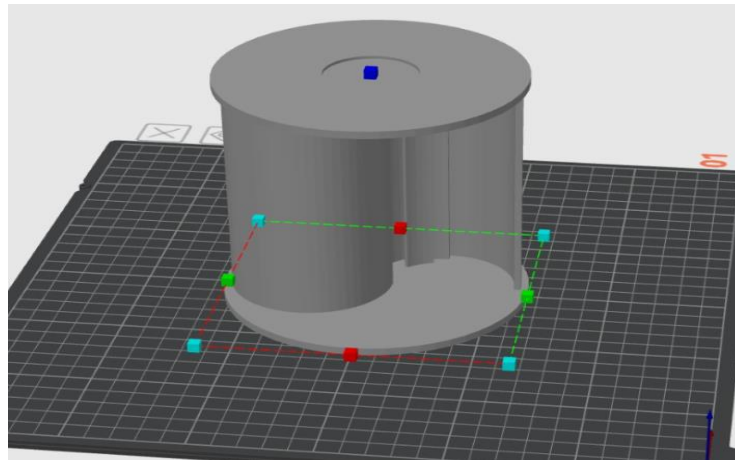
### 2.2.2 INDEPENDENCIA DEL ENMALLADO

Una vez realizado el proceso de enmallado tanto para el rotor Savonius propuesto y el rotor Savonius convencional, se realizó la comprobación para la independencia del enmallado tomando en cuenta diferentes números de TSR y para ser comparados con los resultados obtenidos en la literatura como es el estudio de (Ferrari et al., 2017), en el cual se compararon los tres modelos de turbulencia de Navier Stokes, con el modelo de dos ecuaciones k- $\omega$  SST (Menter's Shear Stress Transport) bien establecido.

## 2.3 IMPLEMENTACION MODELO DE MAYOR EFICIENCIA

Una vez terminado las simulaciones CFD, se realizó el modelo a escala experimental del rotor prototipo 4SP, tomando en cuenta las dimensiones dadas en el estudio propuesto por (Deda Altan et al., 2016). Este mismo fue diseñado haciendo uso del software Onshape, que permitió tener una exactitud comúnmente importante a la hora de evaluar experimentaciones prácticas como lo demuestra el artículo propuesto por (Lin et al., 2024).

*Ilustración 6 – dimensionamiento modelo 4SP.*



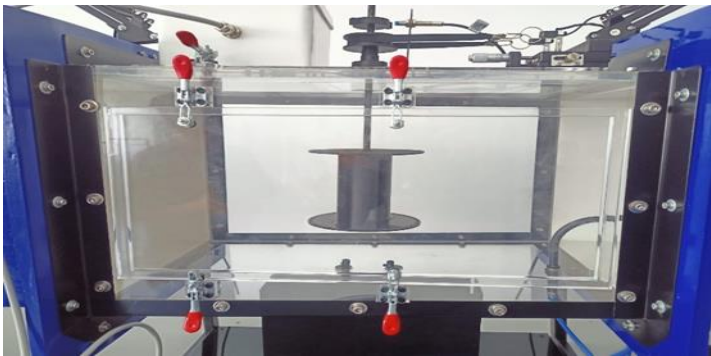
Fuente- Elaboración propia

### 2.3.1 EXPERIMENTACION PRACTICA

Para la experimentación practica se hizo uso de un túnel de viento, herramienta de medición utilizada debido a su capacidad de replicar entornos de simulación variados como en los estudios previos revisados y el artículo desarrollado por (Yoo et al., 2025), en el cual fue la principal fuente de resultados y los análisis se centraron entorno a estos.

Se realizo el montaje de los rotores para la calibración de estos en la experimentación práctica, con el objetivo de conservar la misma configuración a la hora de medir ambos y de esta forma obtener resultados más acertados

Ilustración 7 - Montaje rotores



Fuente- Elaboración propia

Los componentes utilizados para la elaboración de la experimentación practica del rotor Savonius convencional y el prototipo 4SP fueron los siguientes

Tabla 2

En la siguiente tabla se presentan los componentes del túnel de viendo utilizado para la realización de las pruebas practicas el estudio. *Tabla componentes túnel de viento*

| Elemento                 | Cantidad | Imagen | Utilidad                                      |
|--------------------------|----------|--------|-----------------------------------------------|
| Túnel de viento          | 1        |        | Sistema de estudio para ensayos aerodinámicos |
| Análogo columna liquida  | 1        |        | Medición velocidad del viento                 |
| Computo DAQ              | 1        |        | Toma de datos y control de pantalla           |
| Generador de humo        | 2        |        | Visualización del flujo                       |
| Amenoro de hilo caliente | 1        |        | Medición de velocidad en zonas especificas    |

Banco de  
pruebas

1



Banco de pruebas de turbina  
de eje vertical VAWT que  
permite obtener torque estático,  
RPM y torque dinámico para  
calcular coeficiente de potencia

Fuente- Elaboración propia

## 2.4 COMPARACION DATOS OBTENIDOS

Se realizó la comparación en los datos obtenidos por el rotor Savonius convencional y prototipo, tanto de la simulación, como de la experimentación práctica resultantes del túnel de viento, haciendo uso de las siguientes formulas

**Coefficiente de torque de un aerogenerador (Ecuación 3):**

$$C_m = (T / 0.5 * \rho * A * V^2 * R)$$

$C_m$  es el coeficiente de torque,  $T$  representa el torque generado por el aerogenerador,  $\rho$  es la densidad del aire,  $A$  corresponde al área efectiva del rotor,  $V$  es la velocidad del viento y  $R$  es el radio del rotor.

**Coefficiente de potencia (Ecuación 4):**

$$C_p = C_m * TSR$$

Donde  $TSR$  es la relación de velocidad de la punta del aspa (Tip Speed Ratio) y  $C_m$  es el coeficiente de torque. (Sharma & Sharma, 2016)

Esto permitió el análisis de los resultados simulados y prácticos, siendo los puntos de comparación principales para deducir si se presentaron mejoras en la eficiencia o en el arranque del rotor Prototipo con respecto al rotor Savonius convencional, al igual que en estudios previos recientes de esta área tales como el de (Abdel-razak et al., 2025), en el cual se basaron en estos para la conclusión de su artículo.

## 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inicialmente se realizó una comprobación de la independencia del enmallado. Esto es importante realizarlo ya que la forma de solución del método de volúmenes finitos es dividir el dominio en volúmenes y solucionar las ecuaciones de Navier-Stokes para cada volumen. Entre más divisiones existan, la solución es más precisa, pero se compromete el recurso computacional. Por este motivo es importante encontrar un balance entre el número de elementos utilizados y el tiempo de simulación (Sección 3.1). Luego de comprobar el número de elementos adecuado para la simulación, es importante realizar una comprobación de que el ambiente de simulación está replicando datos reales como lo hacen en diferentes estudios para la validación de sus prototipos, como el propuesto por (Afify et al., 2025). Esto se hizo comparando los resultados obtenidos de la simulación con datos experimentales obtenidos de la literatura (Sección 3.1.1). Posteriormente, se muestran los resultados de los escenarios evaluados definiendo cuál de las configuraciones resultó en un aumento significativo de la eficiencia (Ver Ilustración 2). Por último, se muestran las pruebas experimentales del rotor propuesto

### 3.1 Resultados independencia del enmallado

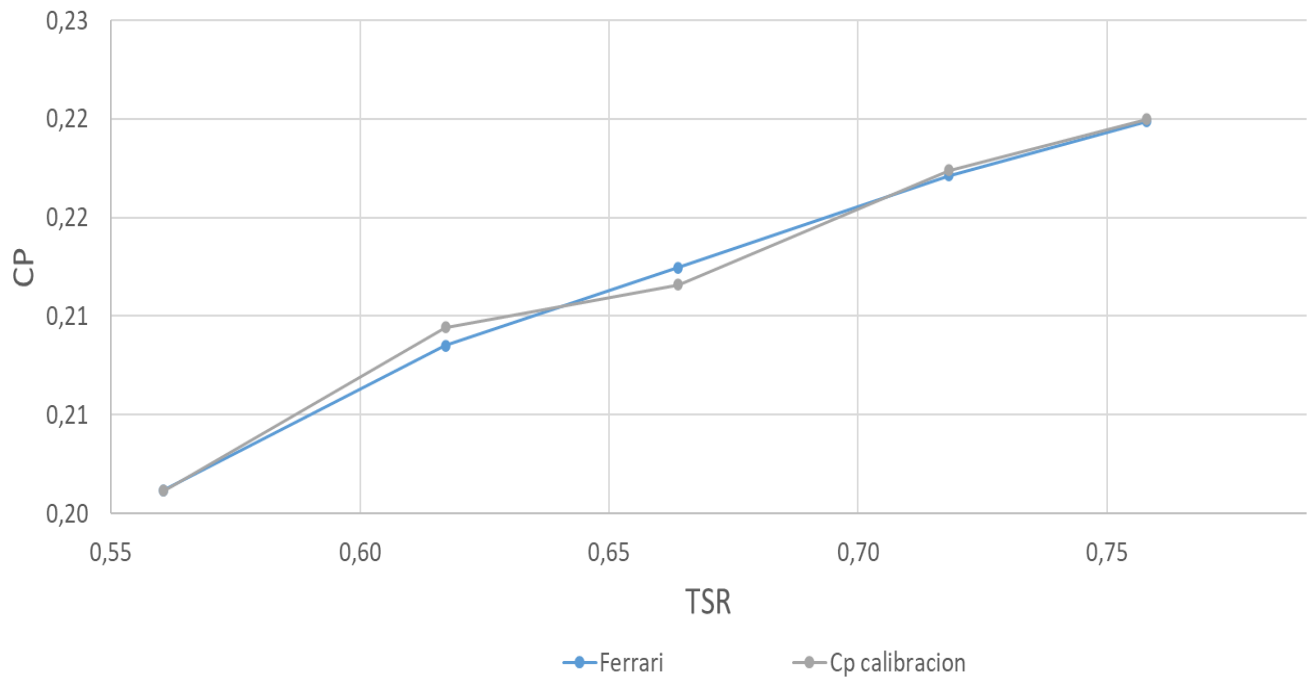
Una vez definido el método de solución y realizado los diseños geométricos, se realizó la calibración del rotor Savonius convencional, para de esta forma obtener un ambiente ideal en el cual simular el prototipo, intentando replicar la curva de  $C_m$  obtenida en la literatura, concluyendo los siguientes resultados:

Tabla 3 – Refinamiento de la malla

| Tsr  | 60000 Elementos | 153211 Elementos | 236550 Elementos | 345320 Elementos | Cp.  |
|------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------|
| 0,56 | 0,35            | 0,36             | 0,36             | 0,36             | 0,20 |
| 0,62 | 0,34            | 0,34             | 0,34             | 0,34             | 0,21 |
| 0,66 | 0,31            | 0,32             | 0,32             | 0,32             | 0,21 |
| 0,72 | 0,29            | 0,30             | 0,30             | 0,30             | 0,22 |
| 0,76 | 0,28            | 0,28             | 0,29             | 0,29             | 0,22 |

Fuente- Elaboracion propia

Como se observo en los resultados obtenidos para 60000 elementos en una TSR de 0,76 se obtuvo el valor de 0,27841, que al ser comparados con los presentados en el articulo de (Ferrari et al., 2017), donde para esta misma fue de 0,29010, la proximidad de los datos fue mas que aceptable, siendo esta de  $\approx 95.97\%$ , sin embargo al aumentar el valor de este mismo como en 345320 elementos donde para el mismo TSR los valores obtenidos fueron de 0,28945036 la proximidad de los mismos es de  $\approx 99.78\%$ , por lo que se concluyó que al trabajar con un mayor número de elementos existe una mayor precisión a la hora de calibrar los datos, como también fue demostrado en el hallazgo de

*Ilustración 8 - Independencia del enmallado.*

Fuente- Elaboración propia

Como se logra observar en la Ilustración 8, en la cual se trabajó la calibración en diferentes números de TSR con el máximo número de elementos trabajados 345320, la similitud de los datos que se obtuvo de manera general fue de 96.83%, considerando de esta forma una calibración de enmallado ideal para realizar las pruebas del prototipo.

### 3.2 Prototipos

Terminada la independencia se realizó la simulación computacional a una velocidad de viento de 7m/s y una TSR de 0,62, sabiendo que los valores de mejora obtenidos en esta deberían de conservarse como lo es demostrado en la ilustración 6.

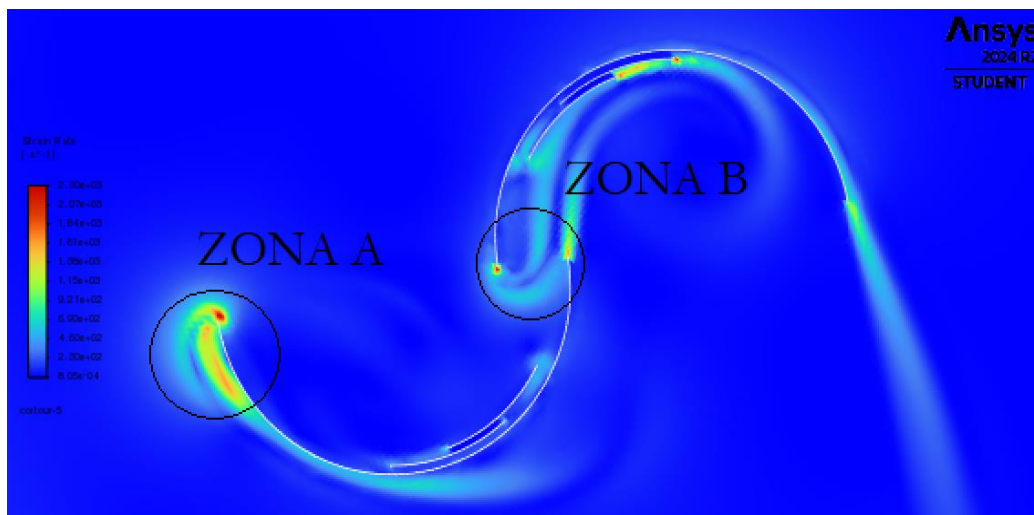
**Tabla 4 -Resultados prototipos**

| TSR  | 2C2O       | P2C       | 2TP   | 2TPD | 4SP  |
|------|------------|-----------|-------|------|------|
| 0,62 | 0,00024239 | 0,0003245 | 0,345 | 0,23 | 0,36 |

Fuente- Elaboración propia

Al terminar las simulaciones se pudo apreciar que el prototipo con los mejores resultados fue el 4SP, con una diferencia de 0,015 con respecto al segundo rotor con mejores resultados, el 2TP.

**Ilustración 9 – Rotor 4sp, Flujo Residual.**



Fuente – Elaboración propia.

La Ilustración 9 demuestra que el prototipo 4SP presenta un mejor rendimiento en comparación con otros modelos, como se corrobora en los datos de la Tabla 4. Este comportamiento superior se debe principalmente a dos factores interrelacionados: la mejora en la eficiencia general del rotor y el aprovechamiento óptimo del flujo residual en la Zona B, donde se desarrolla el fenómeno de Jet Flow. Este flujo acelerado no solo contribuye a alimentar y disipar los Tip Vórtices generados en la Zona A, sino que también permite redirigir efectivamente la energía hacia las palas del rotor.

Un aspecto fundamental observado es cómo el Jet Flow controlado en la Zona B ayuda a mitigar las pérdidas aerodinámicas asociadas a los Tip Vórtices. La geometría mejorada del 4SP juega un papel crucial en este proceso, ya que reduce significativamente las pérdidas por arrastre negativo mientras optimiza el flujo residual. Esta combinación de características explica la notable diferencia de rendimiento entre el prototipo 4SP y los demás modelos evaluados.

Los resultados obtenidos confirman que la interacción entre el Jet Flow en la Zona B y los Tip Vórtices en la Zona A es determinante para el desempeño del rotor. La capacidad del diseño 4SP para gestionar simultáneamente estos fenómenos fluidodinámicos lo posiciona como la configuración más eficiente bajo las condiciones analizadas, validando así su selección como solución óptima para aplicaciones de energía eólica.

#### 3.2.1 Pruebas computacionales

Una vez se escogió el prototipo se realizó las simulaciones para diferentes TSR, conservando el mismo número de

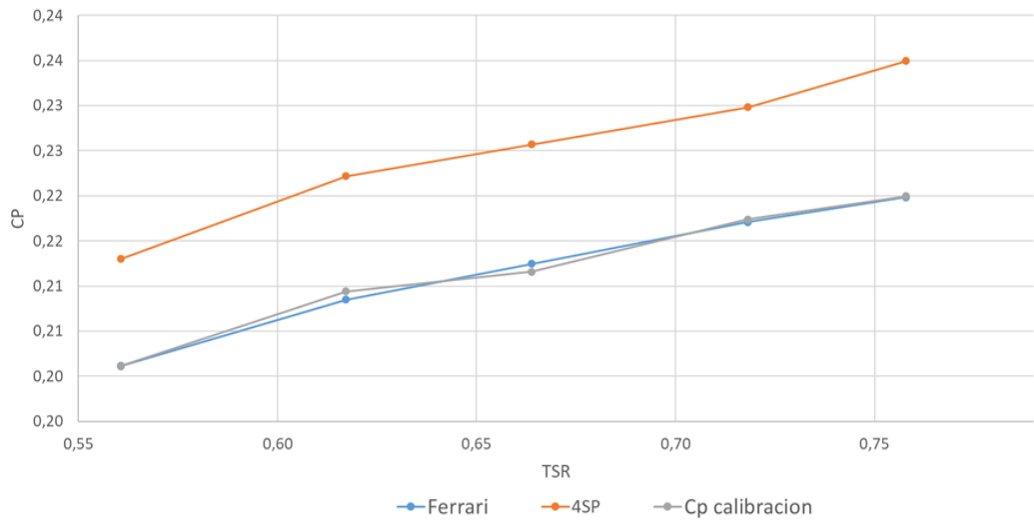
elementos, para comparar los resultados con el rotor Savonius convencional.

Tabla 5 – Resultados rotor convencional y 4sp

| TSR<br>Ferrari | Cp Ferrari | Cp Mark<br>Jv |
|----------------|------------|---------------|
| 0,56           | 0,20       | 0,21          |
| 0,62           | 0,21       | 0,22          |
| 0,66           | 0,21       | 0,23          |
| 0,72           | 0,22       | 0,23          |
| 0,76           | 0,22       | 0,23          |

Fuente- Elaboración propia

Ilustración 10 - resultados 4sp y rotor convencional.



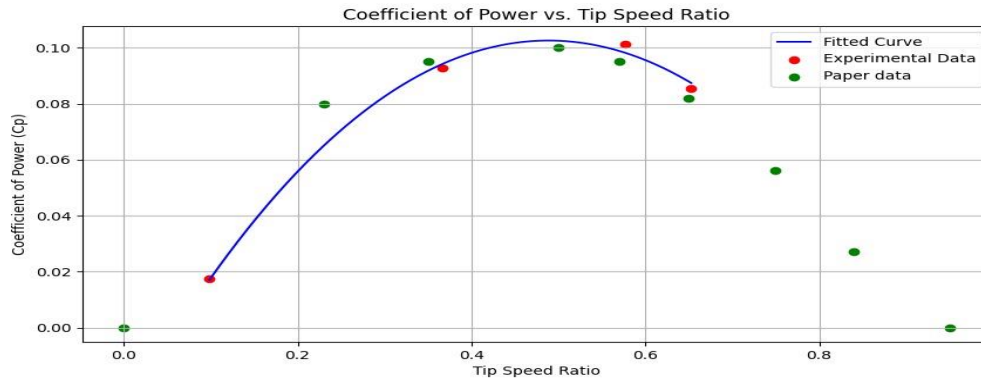
Fuente- Elaboración propia

Al apreciar la Ilustración 10, se comparan los resultados del rotor prototipo 4SP este presento una mejora general del 6,3% con respecto al convencional en valores de TSR que van desde 0,56 a 0,76, concluyendo así las simulaciones computacionales

Calibración Pruebas Experimentales

Los resultados obtenidos durante el montaje y simulación del rotor Savonius convencional tomando en cuenta una densidad del viento de 1,06 kg/m3 y una velocidad de 15 m/s, para la prueba dinámica, aplicando interpolación sobre estos mismos fueron los siguientes

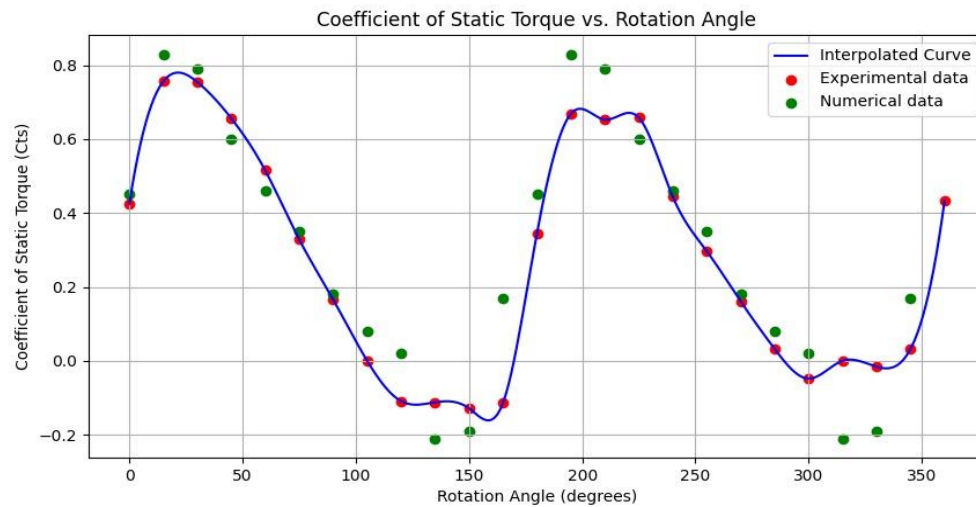
### ***Ilustración 11 - Prueba dinámica rotor Savonius convencional.***



Fuente- Elaboración propia

Como se puede observar en la Ilustración 11, se aprecia una paridad de comportamiento en los resultados, comparándolos con los obtenidos en el artículo (De Altan et al., 2016), en el cual se realizan las pruebas sobre un rotor Savonius convencional de mismas dimensiones, donde por medio de dichas pruebas experimentales se afirma la calibración del modelo de serie del Rotor Savonius en lo que a Prueba Dinámica se refiere. Se aprecia un porcentaje de similitud en ambas pruebas de un valor 88.73% en los valores de TSR que se pudieron replicar mediante el túnel de viento, estas variaciones de similitud pudieron ser dadas por diferentes factores tales como el ángulo del rotor, densidad del viento y posibles controles de vibraciones dentro de la ambientación del túnel con la estructura del rotor.

### ***Ilustración 12 - Prueba estática rotor Savonius convencional.***



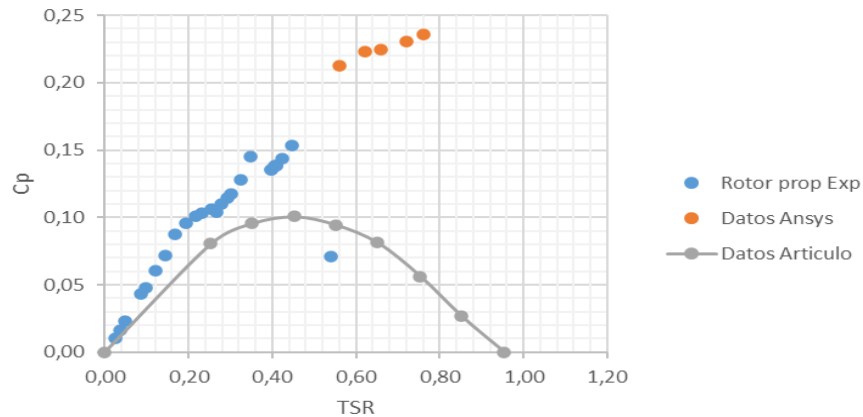
Fuente- Elaboración propia

Como se aprecia en la Ilustración 12, se presenta una similitud en el comportamiento de los datos hallados luego de culminar la Prueba estática dentro del túnel de viento, comparándolos con los obtenidos en el artículo (De Altan et al., 2016), en el cual se realizan las pruebas sobre un rotor Savonius convencional de mismas dimensiones. Los porcentajes de similitud fue del 87,3% sin embargo este porcentaje se vio bastante afectado en los ángulos en los que el coeficiente de torque alcanzaba sus extremos, respectivamente eran 0.8 y -0.2.

### a. Pruebas prototipo túnel de viento

Estos fueron los resultados obtenidos al probar la configuración propuesta 4SP en el túnel de viento tomando en cuenta la misma configuración utilizada para el rotor Savonius convencional con el cambio de utilizar una velocidad de viento mayor, en este caso 20m/s

***Ilustración 13 -Prueba dinámica Prototipo.***



Fuente- Elaboración propia

Como se observa en la Ilustración 13, en comparación de los resultados obtenidos en el artículo, no se logró llegar a valores de TSR tan altos porque se presentaron desfases en el número de Reynolds. En la simulación el número de Reynolds promedio fue alrededor de 473757 mientras que en la experimentación estos fueron, el número de Reynolds se estimó alrededor de 118304. Si bien se muestra una tendencia entre los datos experimentales y los datos obtenidos de la simulación, no fue posible probar el rotor a TSR superiores a 0.6 ya que para el tamaño del rotor que se probó en el túnel de viento, este requiere velocidades de viento de superiores a 30m/s, que se salen del alcance del túnel viento.

## 4 CONCLUSIONES

La literatura existente y análisis previos sugieren consistentemente que la adición de palas internas representa una base teórica sólida para mejorar la eficiencia de los rotores Savonius (Al-Ghriybah & Lagum, 2024). Esta hipótesis fue validada mediante simulación computacional (CFD) utilizando ANSYS Fluent con el modelo de turbulencia k- $\omega$  SST. Específicamente, el prototipo denominado "4SP", desarrollado tras evaluar y descartar cinco configuraciones alternativas (Ostos et al., 2019) demostró en el entorno virtual un incremento notable en el coeficiente de potencia ( $C_p$ ) del 6.3% en comparación con el diseño Savonius convencional. Este resultado se obtuvo tras asegurar la independencia de la malla, garantizando la fiabilidad de la simulación.

El diagrama de flujo residual (Ilustración 8) permitió observar un mejor aprovechamiento del Jet Flow en la Zona B, resultado directo de las modificaciones geométricas aplicadas al rotor Savonius convencional. Estas innovaciones en el diseño, particularmente la geometría segmentada, lograron dos efectos clave: por un lado, generaron vórtices secundarios controlados en la región interpalar, y por otro, redujeron significativamente la separación de la capa límite, manteniendo un flujo adherido a lo largo de las palas. Este comportamiento fluidodinámico explica cómo el prototipo optimizó la extracción de energía eólica, al transformar de manera más eficiente la energía cinética del viento en momentos útiles de producción energética.

A pesar del éxito en simulación, las pruebas experimentales realizadas en el Túnel de Viento del Laboratorio de Energías Inteligentes no lograron replicar los niveles de rendimiento previstos, específicamente en cuanto a las ratios de velocidad punta (TSR) esperados (ver Ilustración 13). La principal causa identificada para esta discrepancia radica en la dificultad para

alcanzar una paridad completa entre las condiciones ambientales calibradas en el entorno experimental y las definidas en el entorno virtual. Lograr la similitud dinámica, fundamentalmente igualando el Número de Reynolds en ambas condiciones, resultó complejo. Es relevante notar que, en simulación, el prototipo 4SP mostró requerir menos energía para iniciar su funcionamiento óptimo en comparación con el rotor convencional, una ventaja que no pudo ser completamente validada experimentalmente debido a las limitaciones mencionadas.

Si bien las simulaciones computacionales indican claramente el potencial del diseño 4SP con palas internas para superar la eficiencia del rotor Savonius tradicional, la validación experimental enfrentó obstáculos significativos relacionados con la replicación exacta de las condiciones de flujo y la consecución de la similitud dinámica. Futuros trabajos deberían enfocarse en refinar las metodologías experimentales para asegurar una comparación más directa con los resultados de simulación o en desarrollar técnicas de calibración que permitan una mejor correspondencia entre ambos entornos.

## 5 REFERENCIAS

- Abdel-razak, M. H., Emam, M., & Hassan, H. (2025). A computational assessment of adjusting the radius ratio and attachment angle on the performance of hybrid vertical axis wind turbines of Darrieus and Savonius designs. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 47(5). <https://doi.org/10.1007/s40430-025-05473-5>
- Afify, R., Saber, E., & Awad, H. (2025). Investigation of an innovative savonius turbine in practice. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88544-w>
- Al-Ghriybah, M., & Lagum, A. A. (2024). Enhancing the Aerodynamic Performance of the Savonius Wind Turbine by Utilizing Quarter Elliptical Supplementary Blades. *Flow, Turbulence and Combustion*, 112(2), 491–508. <https://doi.org/10.1007/s10494-023-00516-0>
- Anlló, G. (2022). 2.3. TRANSICIÓN ENERGÉTICA Y AGENDA 2030: EL ODS 7. [www.un.org/es/chronicle/article/objetivo-7-garantizar-el-acceso-una-](http://www.un.org/es/chronicle/article/objetivo-7-garantizar-el-acceso-una-)
- Chegini, S., Asadbeigi, M., Ghafoorian, F., & Mehrpooya, M. (2023). An investigation into the self-starting of darrieus-savonius hybrid wind turbine and performance enhancement through innovative deflectors: A CFD approach. *Ocean Engineering*, 287. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115910>
- Deda Altan, B., Altan, G., & Kovan, V. (2016). Investigation of 3D printed Savonius rotor performance. *Renewable Energy*, 99, 584–591. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.043>
- Ferrari, G., Federici, D., Schito, P., Inzoli, F., & Mereu, R. (2017). CFD study of Savonius wind turbine: 3D model validation and parametric analysis. *Renewable Energy*, 105, 722–734. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.077>
- Ghafoorian, F., Mirmotahari, S. R., Eydzadeh, M., & Mehrpooya, M. (2025). A systematic investigation on the hybrid Darrieus-Savonius vertical axis wind turbine aerodynamic performance and self-starting capability improvement by installing a curtain. *Next Energy*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2024.100203>
- Guo, S., Zhang, Z., & Mei, L. (2025). Adaptive time-stepping Hermite spectral scheme for nonlinear Schrödinger equation with wave operator: Conservation of mass, energy, and momentum. *Journal of Computational Physics*, 528. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2025.113842>
- Haddad, H. Z., Elsayed, K., Shabana, Y. M., & Mohamed, M. H. (2021). Comprehensive influence of the additional inner blades with different configurations on the performance of a Savonius wind turbine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1956645>
- Laubscher, R., & Rousseau, P. (2022). Application of a mixed variable physics-informed neural network to solve the incompressible steady-state and transient mass, momentum, and energy conservation equations for flow over in-line heated tubes. *Applied Soft Computing*, 114. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.108050>

- Lin, J., Yang, X., Niu, S., Yu, H., Zhong, J., & Jian, L. (2024). Inflatable Savonius wind turbine with rapid deployment and retrieval capability: Structure design and performance investigation. *Energy Conversion and Management*, 310. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118480>
- Ostos, I., Ruiz, I., Gajic, M., Gómez, W., Bonilla, A., & Collazos, C. (2019). A modified novel blade configuration proposal for a more efficient VAWT using CFD tools. *Energy Conversion and Management*, 180, 733–746. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.025>
- Rizk, M., & Nasr, K. (2023a). Computational fluid dynamics investigations over conventional and modified Savonius wind turbines. *Heliyon*, 9(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16876>
- Rizk, M., & Nasr, K. (2023b). Computational fluid dynamics investigations over conventional and modified Savonius wind turbines. *Heliyon*, 9(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16876>
- Sarmiento-Laurel, C., Díaz, A. J., Torres, I., Cáceres-González, R., & Silva-Llanca, L. (2025). 3D numerical analysis of an H-rotor darrieus vertical axis wind turbine in transient regime. *Energy*, 324, 135849. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135849>
- Shamsuddin, M. S. M., Kamaruddin, N. M., & Mohamed-Kassim, Z. (2022). The influence of material on the power performance of Savonius turbines in wind and water applications. *Ocean Engineering*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112638>
- Sharma, S., & Sharma, R. K. (2016). Performance improvement of Savonius rotor using multiple quarter blades – A CFD investigation. *Energy Conversion and Management*, 127, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.087>
- Singh, A., Joshi, A., Pope, F. D., Singh, B., Khare, M., Kota, S. H., & Radcliffe, J. (2024). Evaluating alternative technologies to diesel generation in India using multi-criteria decision analysis. *Cleaner Energy Systems*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2024.100133>
- Wang, X. H., Foo, J. S. Y., Fazlizan, A., Chong, W. T., & Wong, K. H. (2024). Effects of endplate designs on the performance of Savonius vertical axis wind turbine. *Energy*, 310. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133205>
- Yigit, C. (2024). Numerical investigation of specific performance parameters of the S-ROTOR; a Savonius type turbine design. *Ocean Engineering*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116314>
- Yoo, C., Kwon, D., Park, S., Hwang, S., Ha, K., & Kim, K. (2025). Upcycling of wasted fabrics into savonius wind turbine rotor and experimental validation of design modifications for performance enhancement by wind tunnel test. *Journal of Mechanical Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s12206-025-0112-x>