

Diseño y simulación de un aerogenerador de eje vertical mediante Solidworks Flow Simulation para hallar los coeficientes estáticos de torque

Montenegro S., Nicoletti P., Villanueva A., Ganiele J., Lingeri S., Quinteros L., Anello D., Melo M., Ponzoni L.

RESUMEN

El compromiso de nuestro país respecto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y nuevas normativas asociadas a las energías renovables, combinadas con el potencial eólico de Argentina, promovieron el desarrollo de las energías renovables en todas sus escalas. Hoy en día, las tecnologías de baja potencia constituyen posibles soluciones a problemas de abastecimiento de energía eléctrica que enfrentan las zonas alejadas de las grandes urbes. Las turbinas eólicas de eje vertical son consideradas menos eficientes que las turbinas eólicas convencionales de eje horizontal, por eso es relevante estudiar con detenimiento sus características aerodinámicas. En este trabajo, se investigaron numéricamente los coeficientes estáticos de torque de una turbina eólica Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0,15 y número de Reynolds de 120.000, utilizando SolidWorks Flow Simulation® y empleando modelos experimentales de Kamoji, Kedare y Prabhu. Los coeficientes estáticos de torque se hallaron mediante un método de cálculo, utilizando valores de presión obtenidos mediante fluidodinámica computacional. Asimismo, en este trabajo se plantea a partir de los coeficientes estáticos de torque, encontrar la relación de superposición óptima de los álabes y la capacidad de autoarranque de aerogenerador.

ABSTRACT

The adoption of Sustainable Development Goals and new regulations associated with renewable energies in our country, combined with wind potential, promoted the development of renewable energies at all levels. Today, low-power technologies are possible solutions to problems of electricity supply faced by areas far away from big cities. Vertical axis wind turbines are considered less efficient than the conventional horizontal axis wind turbines, so it is relevant to carefully study its aerodynamic characteristics. In this work, static torque coefficients of a Savonius wind turbine with semicircular blades, overlap ratio of 0,15 and Reynolds number of 120.000, were investigated numerically using SolidWorks Flow Simulation® and using models that were experimentally corroborated by Kamoji, Kedare y Prabhu. Static torque coefficients were found by a calculation method using pressure values obtained by Computational Fluid Dynamic. Furthermore, this work proposed that by this method for evaluated static torque coefficients, optimal overlap ratio can be found and examined self-starting capability.

PALABRAS CLAVE

Energía eólica, aerogenerador, Savonius, coeficientes estáticos de torque, fluidodinámica computacional.

KEY WORDS

Wind energy, wind turbine, Savonius, static torque coefficients, computational fluid dynamic.

CONTEXTO

Argentina, mediante la Ley 27.191 “Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica”, estableció como objetivo lograr una contribución de las fuentes de energía renovables hasta alcanzar el veinte por ciento (20%) del consumo de energía eléctrica nacional para fines del año 2025. Asimismo en el año 2017, la Ley 27.424 “Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable integrada a la Red Eléctrica Pública” habilitó que los consumidores de electricidad se conviertan en generadores, para autoconsumo y eventual inyección de electricidad a la red, a partir de fuentes de energía renovable. Finalmente, como otros países de Latinoamérica, nuestro país ha suscripto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible los cuales en su Objetivo 7 plantean “Energía asequible y no contaminante” haciendo énfasis en el porcentaje de población que tiene acceso a la electricidad y el porcentaje de la energía renovable en el consumo final total de energía. Por todo ello, fomentar la obtención de energía eléctrica a partir de fuentes renovables es una de las prioridades en la agenda gubernamental.

Las perspectivas de Argentina en materia de energía eólica son francamente alentadoras [1], por lo que el desarrollo de las energías renovables de baja potencia comienza a vislumbrarse como una posibilidad para la generación de energía eléctrica en zonas alejadas de las grandes urbes que, por cuestiones económicas y geográficas, no poseen conexión eléctrica a la red.

El diseño y eficiencia de un aerogenerador depende principalmente de las características del viento de la zona donde se instalará, ya que son las que definen el tipo de aerogenerador a utilizar (eje horizontal o vertical), tipo de perfil, diámetro, altura, generador eléctrico, transmisión, etc. Sin embargo, gran parte de los desarrollos de aerogeneradores de las PyMes y fabricantes locales, guían sus esfuerzos en la construcción de la máquina basando su diseño en la copia de aerogeneradores internacionales, delegando a un plano secundario las características del viento. Esto se debe a la complejidad ingenieril que requieren el desarrollo de este tipo de máquinas y a que muchas de estas empresas, no cuentan con la infraestructura necesaria. En consecuencia, los dispositivos no satisfacen las condiciones mínimas necesarias para un adecuado funcionamiento, lo que implica que cese la producción de energía por desperfectos de diseño o sólo funcionen en ciertos períodos del año.

Una primera forma de mejorar la calidad de los aerogeneradores nacionales es crear un laboratorio de prueba, para que los fabricantes puedan probar sus diseños y analizar sus parámetros de funcionamiento. En este sentido, el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) viene trabajando en la certificación de instaladores de aerogeneradores de baja potencia, y desarrollando un laboratorio a cielo abierto ubicado en la provincia de Neuquén para probar el funcionamiento de los mismos utilizando las curvas de vientos de la zona. Sin embargo, esto no es suficiente. Actualmente, no existe ningún laboratorio

nacional desarrollado para que fabricantes nacionales/universidades o centros de investigación puedan probar sus diseños bajo distintas condiciones de viento. Por eso, desde el laboratorio “Perfil Alar” de la Comisión Nacional de Energía Atómica, se ha conformado un grupo de investigación que se encuentra trabajando en un laboratorio de ensayos de aerogeneradores de baja potencia, de manera de ser un referente a nivel nacional para la prueba y desarrollo de microaerogeneradores.

Para llevar a cabo sus objetivos, desde el laboratorio “Perfil alar” se plantea un método novedoso basado en las siguientes tres etapas: diseño y simulación asistida por computadora en Aerogeneradores; fabricación del modelo en escala mediante impresión 3D; y simulación del modelo en un túnel de viento preparado para la prueba de prototipos de aerogeneradores. Estas tres etapas, se desarrollan dentro de un proceso diseñado ad-hoc que permite determinar en forma económica y simple, no solo la curva característica del aerogenerador y la potencia generada para diferentes curvas de viento, sino hacer los ajustes/cambios de diseño necesarios para maximizar la potencia extraída del aerogenerador.

INTRODUCCIÓN

Las turbinas eólicas generalmente se clasifican en dos familias: aerogeneradores de eje horizontal (HAWT) y aerogeneradores de eje vertical (VAWT). Esta clasificación se refiere a la posición del eje del rotor con respecto al viento [2]. Una de las mayores ventajas de los VAWTs sobre los HAWTs tradicionales, es la capacidad de algunos diseños de comenzar a rotar en condiciones de baja velocidad de viento. Para los VAWTs, el generador puede estar ubicado en el suelo, lo que es menos costoso y más conveniente para su instalación y mantenimiento, captando el viento de diferentes direcciones. Por esta razón, los VAWTs son preferibles ante los HAWTs, donde el viento es inestable y existen condiciones de baja velocidad [3].

Un aerogenerador Savonius es un dispositivo de eje vertical que opera esencialmente por las fuerzas de arrastre que genera el viento sobre sus álabes, sin embargo la fuerza de sustentación también contribuye -en menor medida- a la potencia mecánica transmitida al eje [4]. Cuando el viento golpea sus álabes, éstos experimentan fuerzas de arrastre debido a la diferencia de presión entre las superficies cóncavas y convexas [5]. Numerosos investigadores [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11] estudiaron este fenómeno en túneles de viento, evaluando las presiones sobre los álabes con el objetivo de hallar distintos parámetros aerodinámicos de los Savonius.

Otra forma de estudiar los parámetros aerodinámicos de los Savonius es, a través de la aplicación de métodos numéricos que resuelven las ecuaciones de conservación del flujo [4]. Esto se realiza mediante el uso de distintos softwares, algunos de ellos son, Ansys Fluent® [12, 13, 14, 15, 16], SolidWorks Flow Simulation® [17, 18, 19, 20, 21], Star-CCM+® [22] y CFdesign® [23, 24].

La capacidad de autoarranque, es una de las consideraciones importantes al evaluar el rendimiento de los aerogeneradores Savonius, ya que un Savonius con un excelente autoarranque puede comenzar a girar a un número de Reynolds relativamente bajo. El autoarranque, implica que el dispositivo puede iniciar la rotación sin ninguna fuerza de activación adicional o externa [25].

Para estudiar el rendimiento estático de los aerogeneradores Savonius, se puede adoptar un enfoque numérico. Para ello, el coeficiente estático de torque debe evaluarse en diferentes ángulos de rotor (θ), donde el ángulo del rotor se define como el ángulo entre el álabe de la turbina y la dirección del flujo de aire que se aproxima. El coeficiente estático de torque ($C\theta$), es el par ejercido sobre los álabes del dispositivo mientras que se mantiene estacionario. Los bajos coeficientes estáticos de torque (valores negativos o valores cercanos a cero) implican una capacidad de autoarranque muy pobre [25], mientras que los coeficientes estáticos de torque positivos, indican que el rotor puede iniciar en esa posición angular [26].

En este trabajo, se presenta el diseño y simulación de un aerogenerador de eje vertical mediante SolidWorks Flow Simulation® para hallar los coeficientes estáticos de torque.

OBJETIVOS

General

Diseño y simulación de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius mediante SolidWorks Flow Simulation® para hallar los coeficientes estáticos de torque.

Específicos

- Diseñar un aerogenerador Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0,15.
- Obtener los coeficientes estáticos de torque mediante la simulación de un aerogenerador Savonius bajo un número de Reynolds de 120.000, empleando modelos corroborados experimentalmente.
- Utilizar un método de cálculo para hallar los coeficientes estáticos de torque.
- Contrastar los resultados de las simulaciones con los obtenidos mediante modelos corroborados experimentalmente.

METODOLOGIA

En “Experimental Investigations on the Effect of Overlap Ratio and Blade Edge Conditions on the Performance of Conventional Savonius Rotor [6]” se obtienen experimentalmente los valores de presión en puntos a lo largo de la sección media de los álabes de varios Savonius con distintas configuraciones y bajo diferentes condiciones (relación de superposición, tipo de borde de los álabes, número de Reynolds), para encontrar los coeficientes estáticos de torque entre otros. Estos coeficientes se obtienen mediante un método de cálculo detallado en “On the torque mechanism of Savonius rotors [9] y “Pressure measurements and flow visualization study of a Savonius rotor [10]”.

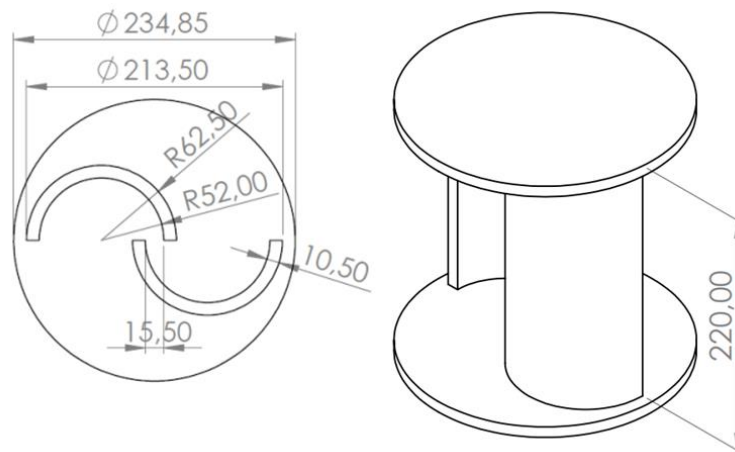
Para hallar los coeficientes estáticos de torque, se dibujó en Solidworks® uno de los modelos de Savonius ensayados en [6]. Con este diseño (Figura 1) se realizaron las simulaciones, se calcularon los coeficientes y se contrastaron los resultados con los obtenidos experimentalmente [6]. En la tabla 1, se definen los parámetros de diseño del modelo utilizado.

Tabla N° 1: Parámetros de diseño del modelo utilizado.

Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro del rotor (D)	213,5	mm
Altura (H)	220	mm
Radio interior del alabe (R_{int})	52	mm
Radio exterior del alabe (R_{ext})	62,5	mm
Espesor del álabe (t)	10,5	mm
Distancia entre álabes (a)	15,5	mm
Relación de superposición = $\frac{a}{2(R_{ext}-t)}$	0,15	Adimensional
Relación de aspecto = $\frac{H}{D}$	1	Adimensional
Diámetro de Platos (D_0) = $1,1 * D$	234,85	mm
Espesor del plato	10	mm

Fuente: elaboración propia.

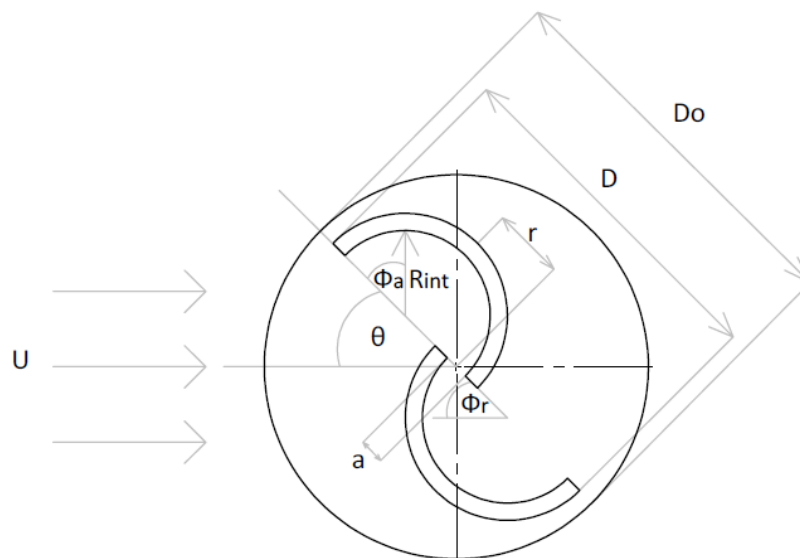
Figura N° 1: Savonius de álabes semicirculares con bordes planos y sin eje.



Fuente: elaboración propia mediante SolidWorks®.

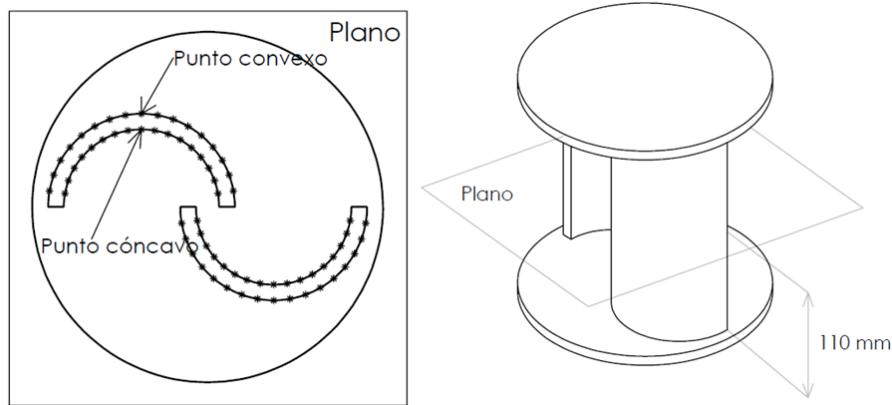
Las simulaciones se realizaron mediante Flow Simulation®, donde se fijaron como objetivos 68 puntos de presión total promedio ubicados cada 10° ($10^\circ < \Phi_{avance} < 170^\circ$, $190^\circ < \Phi_{retroceso} < 350^\circ$) a lo largo de la sección media del dispositivo, es decir, 34 puntos por cada ábale. Se realizaron un total de 12 simulaciones, variando el ángulo de rotor cada 15° ($0^\circ < \theta < 165^\circ$). En la Figura 2, se observa Φ_{avance} , $\Phi_{retroceso}$ y θ ; y en la Figura 3, donde se colocaron los objetivos puntuales de presión de las simulaciones.

Figura N° 2: Savonius con álabes semicirculares.



Fuente: elaboración propia mediante SolidWorks®.

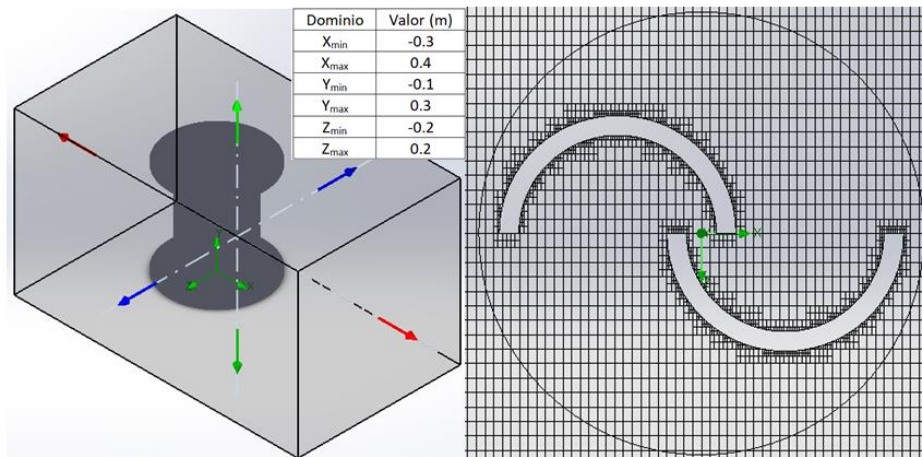
Figura N° 2: Objetivos dispuestos cada 10° a lo largo de la sección media.



Fuente: elaboración propia mediante SolidWorks®.

El análisis CFD (Computational Fluid Dynamics) se realizó de manera estática utilizando flujo externo, presión atmosférica (101.325 Pa), 30°C, número de Reynolds de 120.000 ($U=8,98$ m/s), y un dominio computacional en 3D (Figura 4). El mallado rectangular, se refinó en la superficie de los álabes para obtener mejores resultados.

Figura N° 3: Dominio computacional y mallado.



Fuente: elaboración propia mediante SolidWorks®.

Los coeficientes estáticos de torque se hallaron utilizando el método de cálculo propuesto en los trabajos [6, 9, 10], luego de realizar las simulaciones y obtener los valores de presión. Este método consiste en obtener valores experimentales de presión en puntos dispuestos a lo largo de la sección media del dispositivo, con los cuales se calculan coeficientes de presión. Los coeficientes de presión se emplean para encontrar los coeficientes locales estáticos de torque que, posteriormente, son integrados para hallar los coeficientes estáticos de torque. A continuación, se detallan el método y las condiciones de ensayo que se tomaron para realizar los cálculos de los coeficientes, número de Reynolds y brazo de palanca.

Coefficiente de presión

$$C_{pr} = \frac{2(P - P_{\infty})}{\rho U^2}$$

Donde:

- P = Presión en la superficie del álabe
- P_{∞} = Presión atmosférica (101.325 Pa)
- ρ = Densidad del aire a 30° C (1,164 kg/m³)
- U = Velocidad de corriente libre (8,98 m/s)

Coefficiente local estático de torque, calculado para cada ángulo del álabe, $10^{\circ} < \Phi_a < 170^{\circ}$ cada 10° para el álabe de avance, y entre $190^{\circ} < \Phi_r < 350^{\circ}$ cada 10° para el álabe de retroceso.

$$C_{\Phi} = \frac{R_{int}}{D^2} \Delta C_{pr} r \text{ sen} \Phi$$

Coefficiente estático de torque, calculado para cada ángulo del rotor entre $0^{\circ} < \Theta < 165^{\circ}$ cada 15° .

$$C_{\Theta} = \frac{2R_{int}}{D^2} \left[\int_0^{\Phi_a} \Delta C_{pr} r \text{ sen} \Phi_a d\Phi_a + \int_0^{\Phi_r} \Delta C_{pr} r \text{ sen} \Phi_r d\Phi_r \right]$$

Donde:

- r = Brazo de palanca
- R_{int} = Radio interior del álabe (52 mm)
- D = Diámetro del rotor (213,5 mm)
- ΔC_{pr} = C_{pr} cóncavo – C_{pr} convexo
- Φ_a = Ángulo de álabe de avance
- Φ_r = Ángulo de álabe de retroceso

Número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho UD}{\mu}$$

Donde:

- Re=Numero de Reynolds (120.000)
- D= Diámetro del rotor (213,5 mm)
- ρ = Densidad del aire a 30° C (1,164 kg/m³)
- U = Velocidad de corriente libre (8,98 m/s)
- μ = Viscosidad dinámica a 30°C (1,86.10⁻⁵ N s/m²)

Brazo de palanca

Este valor, se determina como la proyección en el eje x del punto de aplicación de la fuerza (objetivo puntual de presión colocado cada 10°), respecto del origen [7, 9, 24]. Los valores del brazo de palanca dependen del ángulo del álabe Φ .

Para el álabe de avance, se calculan los valores de r dividiéndolos en 4 rangos que abarcan los puntos de presión del 1-8, 9, 10-14 y 15-17, según donde se halle el punto de aplicación de la fuerza respecto al origen. Luego, los valores de r en el álabe de retroceso, son los mismos que para el álabe de avance pero de signo contrario. El origen se encuentra en $a/2$, es decir, a la mitad de la distancia entre álabes.

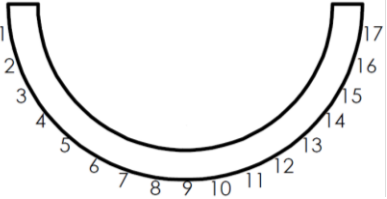
En las tablas 2 y 3, se observa el cálculo del brazo de palanca para ambos álabes, planteando donde se encuentra el origen y enumerando los puntos de presión.

Tabla N° 2: Cálculo del brazo de palanca en el álabe avance con un ángulo de rotor de 0°.

	<p>Puntos del 1 al 8</p> $r = x + \left(R_{int} - \frac{a}{2}\right)$ $x = \cos(\Phi_a) * R_{int}$
	<p>Punto 9</p> $r = R_{int} - \frac{a}{2}$
	<p>Puntos del 10 al 14</p> $r = R_{int} - x - \frac{a}{2}$ $x = \cos(180 - \Phi_a) * R_{int}$
	<p>Puntos del 15 al 17</p> $r = \left(x - R_{int} + \frac{a}{2}\right) * (-1)$ $x = \cos(180 - \Phi_a) * R_{int}$

Fuente: elaboración propia mediante SolidWorks®.

Tabla N° 3: Cálculo del brazo de palanca en el álabe de retroceso con un ángulo de rotor de 0°.

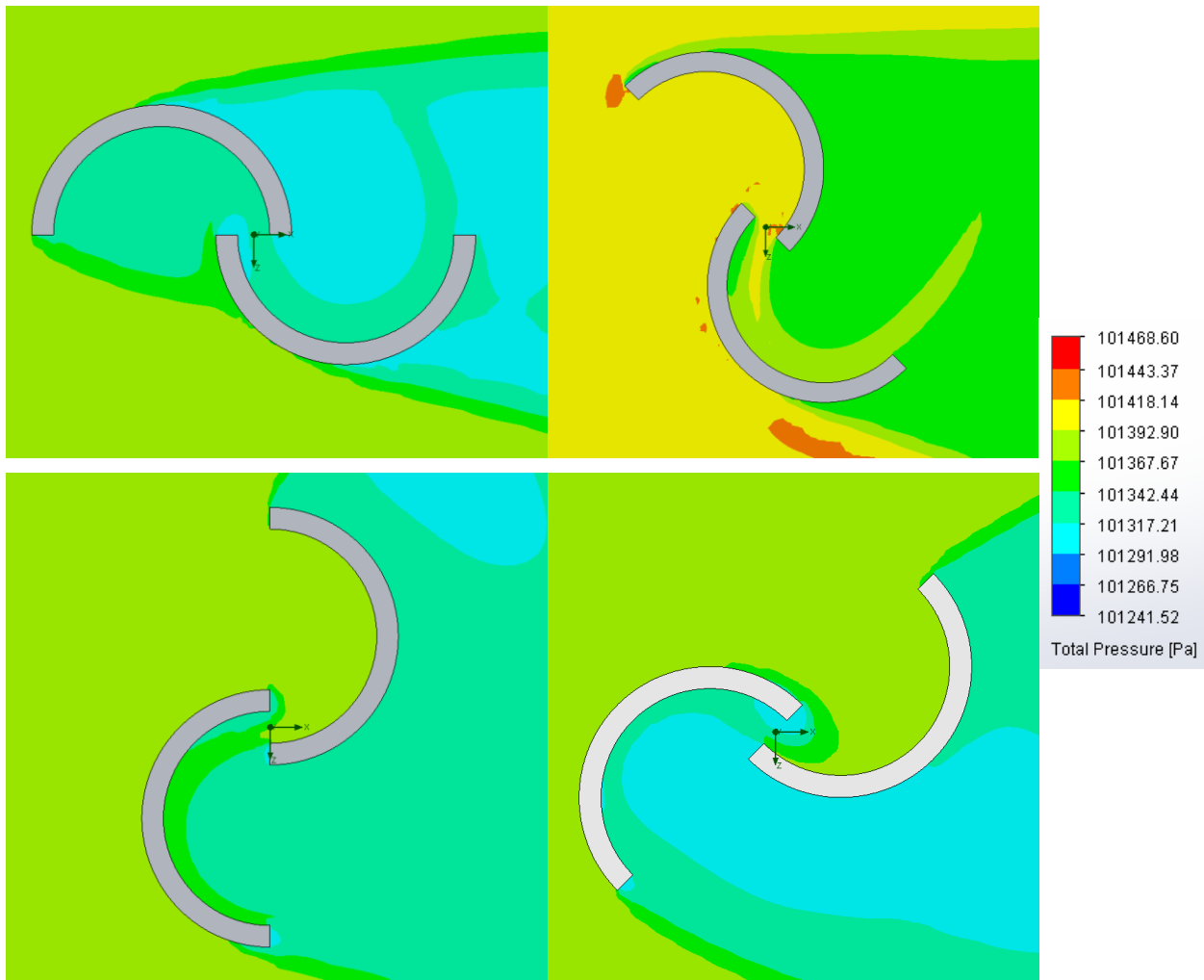
	<p>Puntos del 1 al 3. Idem a puntos 15 al 17 del álabe avance, pero signo de r contrario.</p> <p>Puntos del 4 al 8. Idem a puntos 10 al 14 del álabe avance, pero signo de r contrario.</p> <p>Punto 9. Idem a punto 9 del álabe avance, pero signo de r contrario.</p> <p>Puntos del 10 al 17. Idem a puntos 1 al 8 del álabe avance, pero signo de r contrario.</p>
---	---

Fuente: elaboración propia mediante SolidWorks®.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 5 se observan los contornos de presión obtenidos para un aerogenerador Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0,15 y un número de Reynolds de 120.000.

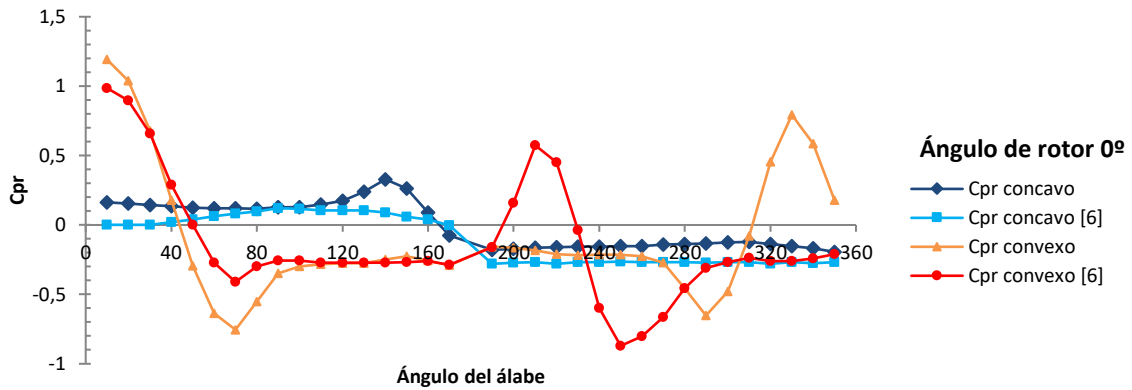
Figura N° 4: Contornos de presión obtenidos para ángulos de rotor de 0°,45°,90° y 135°.



Fuente: elaboración propia mediante SolidWorks®.

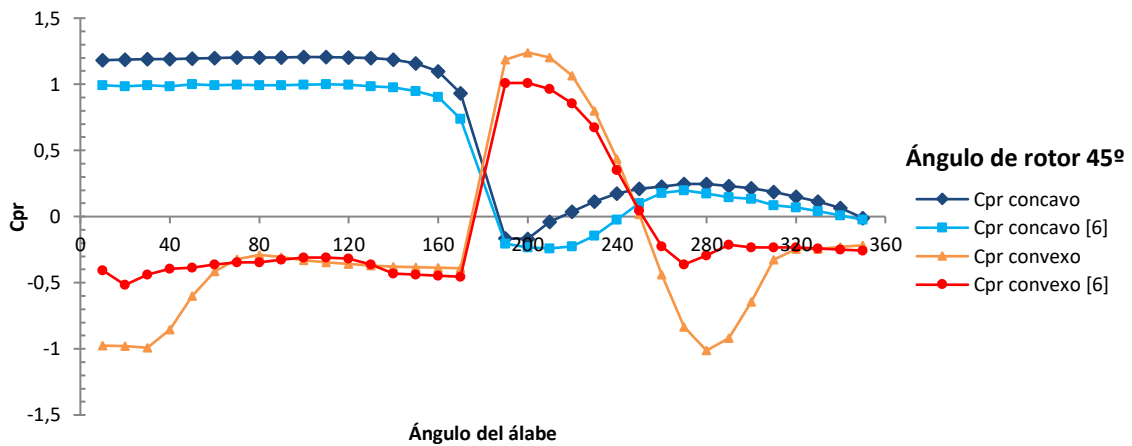
En los gráficos 1, 2, 3 y 4, se observan los coeficientes de presión calculados a partir las simulaciones, y se comparan con los obtenidos mediante resultados experimentales. Se verifica que las tendencias de las curvas son similares y tienen los mismos órdenes de magnitud. Las diferencias entre ambos pueden reducirse con el ajuste de los parámetros de simulación. En el álabe de avance (ángulos de álabe de 0° a 180°), las presiones en la superficie cóncava son mayores que las presiones de la superficie convexa, para los ángulos de rotor de 45°, 90° y 135°. En el álabe de retroceso (ángulos de álabe de 180° a 360°), las presiones de la superficie convexa son mayores que las presiones de la superficie cóncava para un ángulo del rotor de 135°; y para un ángulo del rotor de 0°, se observan diferencias en los coeficientes de presión obtenidos para el lado convexo.

Gráfico N° 1: Coeficientes de presión obtenidos en [6] y calculados a partir de las simulaciones, para un Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0,15 y número de Reynolds de 120.000.



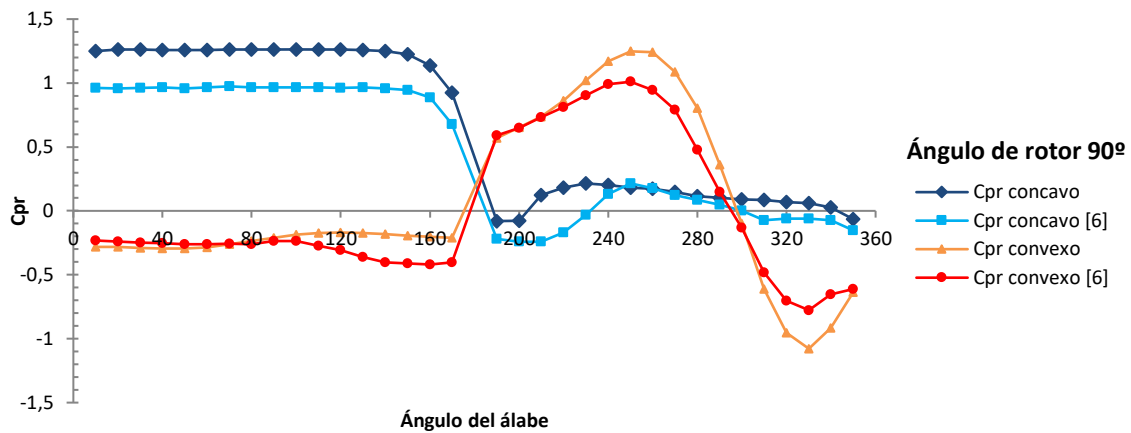
Fuente: elaboración propia.

Gráfico N° 2: Coeficientes de presión obtenidos en [6] y calculados a partir de las simulaciones, para un Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0,15 y número de Reynolds de 120.000.



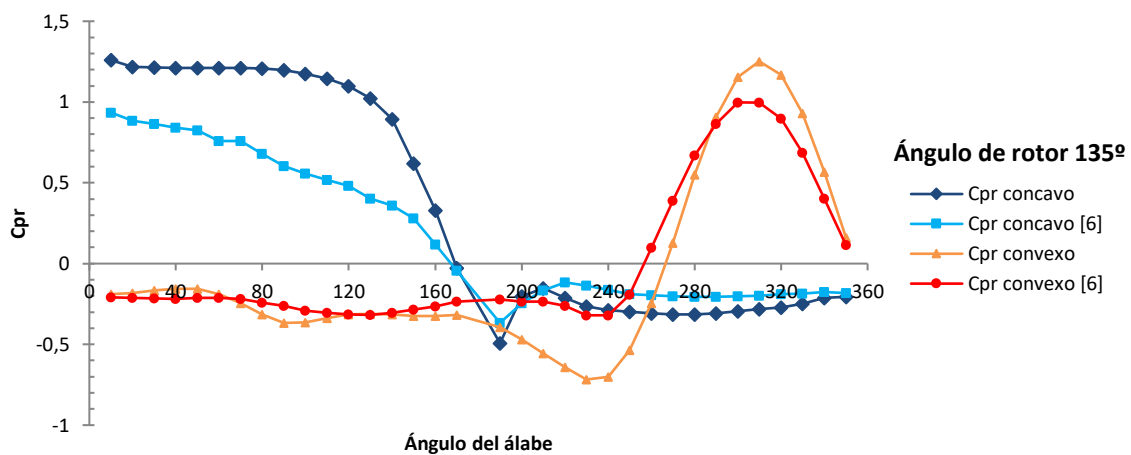
Fuente: elaboración propia.

Gráfico N° 3: Coeficientes de presión obtenidos en [6] y calculados a partir de las simulaciones, para un Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0,15 y número de Reynolds de 120.000.



Fuente: elaboración propia.

Gráfico N°4: Coeficientes de presión obtenidos en [6] y calculados a partir de las simulaciones, para un Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0,15 y número de Reynolds de 120.000.

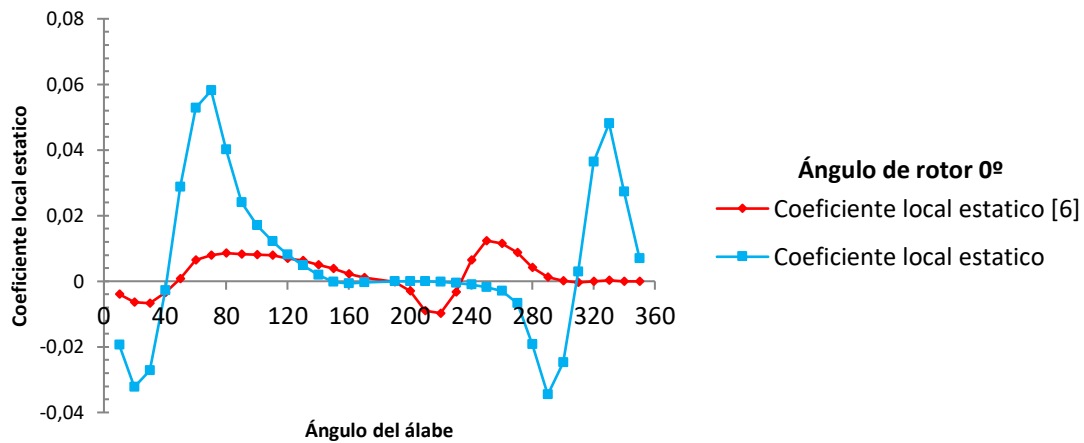


Fuente: elaboración propia.

En los gráficos 5, 6, 7 y 8, se observan los coeficientes locales estáticos de torque calculados a partir de los coeficientes de presión, y se comparan con los obtenidos mediante resultados experimentales. Se observa que las tendencias de las curvas se encuentran en el mismo orden de magnitud pero desfasados respecto de los modelos experimentales. Tanto en el álabe de avance como en el de retroceso, los coeficientes locales estáticos de torque toman valores positivos y negativos para todos los ángulos de rotor. El valor máximo del coeficiente local estático de torque, tanto para los calculados mediante simulaciones como para los obtenidos mediante resultados experimentales, aumenta con el aumento de ángulo del rotor de 0° a 45°, y disminuye a medida que el ángulo del rotor

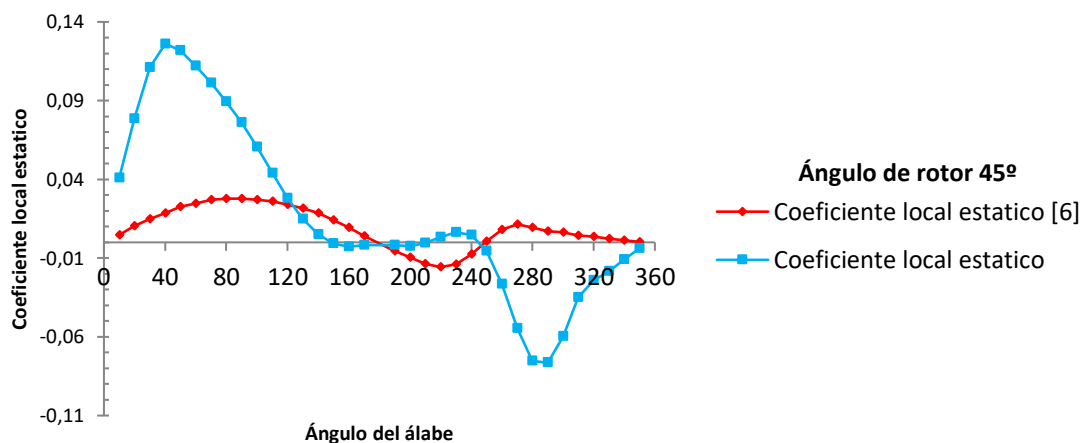
aumenta de 45° a 135°. Las diferencias de presiones entre las superficies cóncavas y convexas en el álabe de avance contribuyen a los coeficientes locales estáticos de torque positivo para todos los ángulos de rotor.

Gráfico N° 5: Coeficientes locales estáticos de torque obtenidos en [6] y calculados a partir de los coeficientes de presión, para un Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0,15 y número de Reynolds de 120.000.



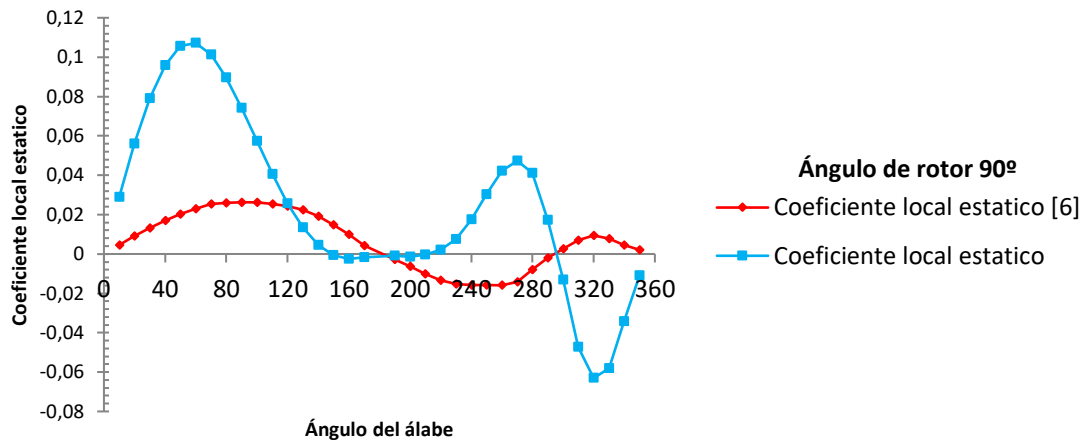
Fuente: elaboración propia.

Gráfico N° 6: Coeficientes locales estáticos de torque obtenidos en [6] y calculados a partir de los coeficientes de presión, para un Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0,15 y número de Reynolds de 120.000.



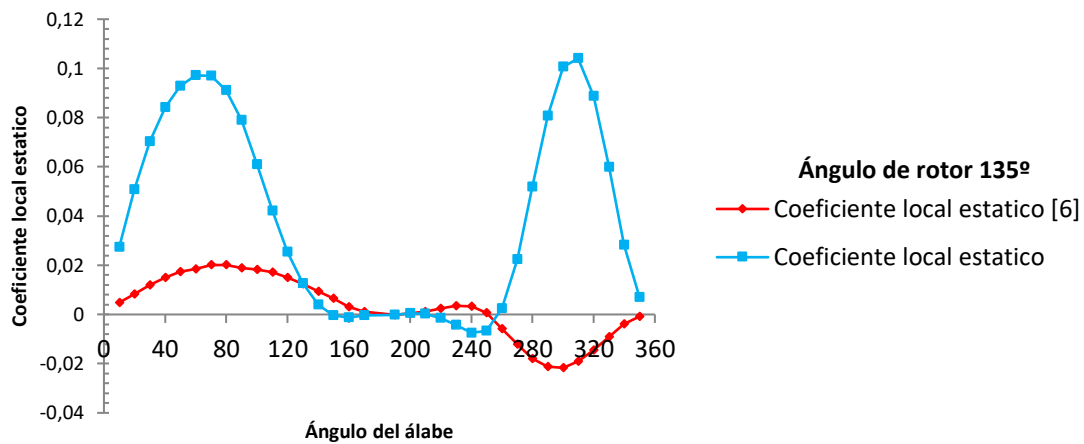
Fuente: elaboración propia.

Gráfico N° 7: Coeficientes locales estáticos de torque obtenidos en [6] y calculados a partir de los coeficientes de presión, para un Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0,15 y número de Reynolds de 120.000.



Fuente: elaboración propia.

Gráfico N° 8: Coeficientes locales estáticos de torque obtenidos en [6] y calculados a partir de los coeficientes de presión, para un Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0,15 y número de Reynolds de 120.000.



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con las diferencias observadas en los gráficos para los coeficientes locales estáticos de torque (gráficos 5, 6, 7 y 8), se compararon los resultados calculados a partir de los coeficientes de presión, con los obtenidos en “On the torque mechanism of Savonius rotors [9]”. En este trabajo, se utiliza el mismo método de cálculo para hallar los coeficientes estáticos de torque de un aerogenerador Savonius con una relación de superposición de 0,15. Sin embargo, existen diferencias entre los dispositivos, como se observa en la Tabla 4, y también respecto a las condiciones experimentales (tamaño de

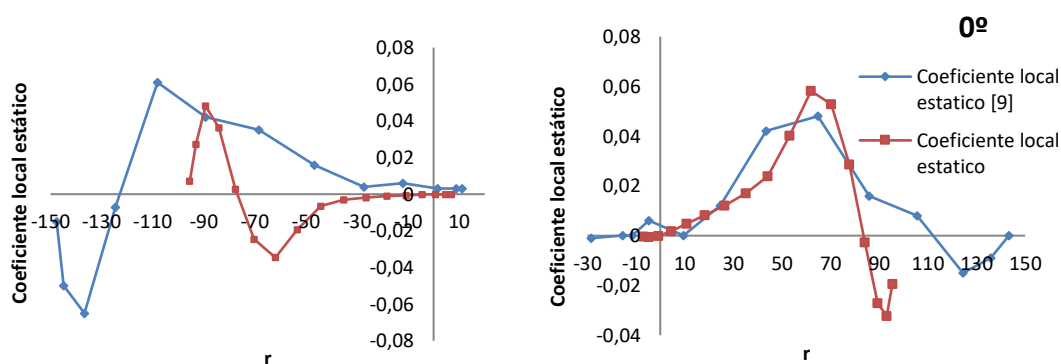
túnel del viento, número de Reynolds, cantidad de tomas de presión, y otros). Los gráficos 9, 10, 11 y 12 muestran los coeficientes locales estáticos de torque en función del brazo de palanca, ya que se sospecha de que dichos valores son los que producen las diferencias observadas anteriormente debido al sistema de referencia tomado por el modelo. En el trabajo de referencia “Experimental Investigations on the Effect of Overlap Ratio and Blade Edge Conditions on the Performance of Conventional Savonius Rotor [6]” no se muestran los valores que toma el brazo de palanca, por lo que se plantearon valores a partir de trabajos relacionados al tema [7, 9, 24]. Como se puede observar en los gráficos 9, 10, 11 y 12, el brazo de palanca para el dispositivo [9] abarca desde -150 hasta 150 mm aproximadamente, lo que coincide con el diámetro del rotor (296 mm).

Tabla N°4: Modelos comparados.

Parámetro	Modelo utilizado	On the torque Mechanism of Savonius rotor
Diámetro del rotor	213,5 mm	296 mm
Altura	220 mm	296 mm
Radio interior del alabe	52 mm	80 mm
Distancia entre álabes	15,5 mm	24 mm
Relación de superposición	0,15	0,15
Relación de aspecto	1	1
Diámetro de Platos	234,85 mm	325,6 mm

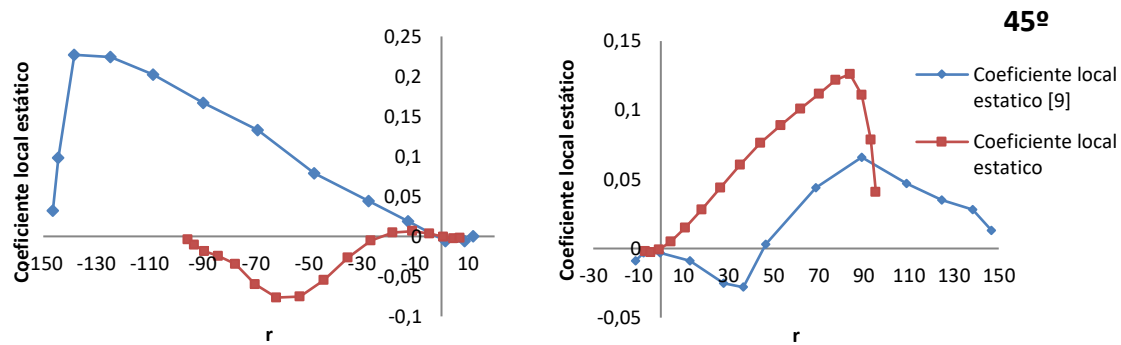
Fuente: elaboración propia.

Gráfico N° 9: Coeficientes locales estáticos de torque obtenidos en [9] y calculados a partir de los coeficientes de presión, para un Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0,15.



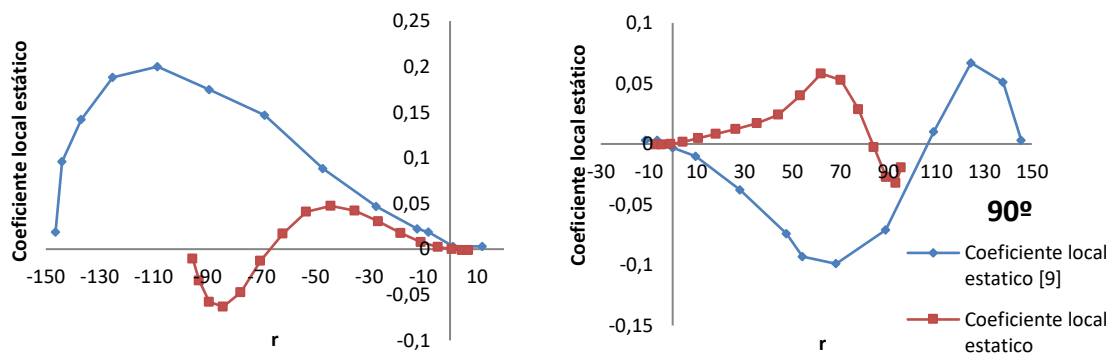
Fuente: elaboración propia.

Gráfico N° 10: Coeficientes locales estáticos de torque obtenidos en [9] y calculados a partir de los coeficientes de presión, para un Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0,15.



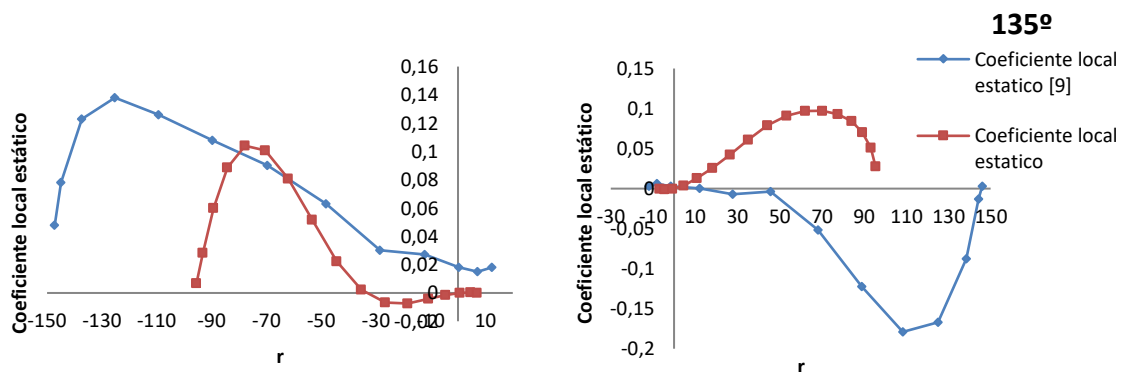
Fuente: elaboración propia.

Gráfico N° 11: Coeficientes locales estáticos de torque obtenidos en [9] y calculados a partir de los coeficientes de presión, para un Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0,15.



Fuente: elaboración propia.

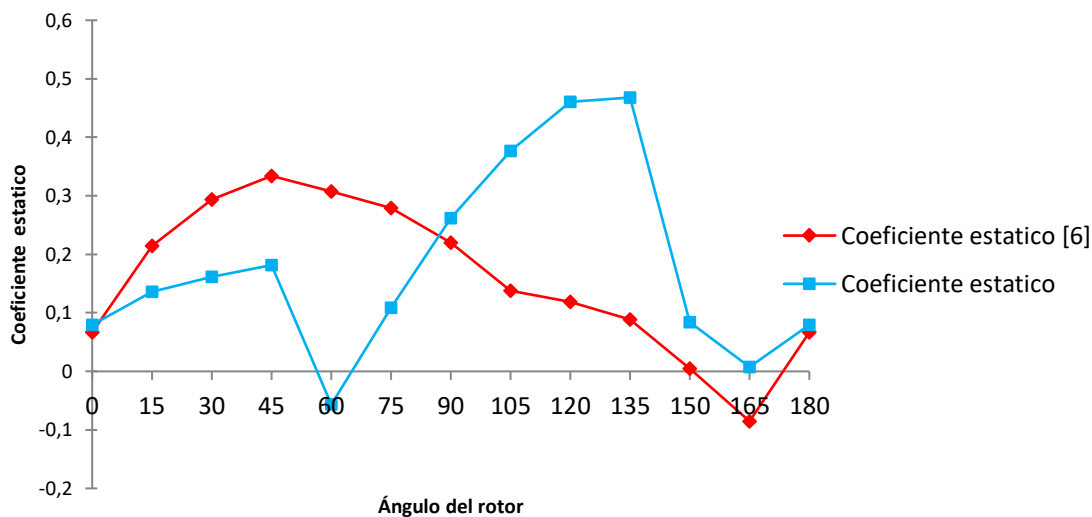
Gráfico N° 12: Coeficientes locales estáticos de torque obtenidos en [9] y calculados a partir de los coeficientes de presión, para un Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0,15.



Fuente: elaboración propia.

En el gráfico 13, se observan los coeficientes estáticos de torque calculados a partir de los coeficientes de presión, y se comparan con los obtenidos mediante resultados experimentales [6]. En los resultados experimentales, se produce un incremento del coeficiente estático de torque para ángulos de rotor de 0° a 45°, y luego disminuye con el aumento del ángulo del rotor entre 45° a 165°, haciéndose negativo en 165°. Para los coeficientes estáticos de torque calculados, se observan valores del mismo orden de magnitud que los resultados experimentales. Asimismo, se observa que ambos resultados tienen una tendencia similar en los extremos de la curva. El incremento y la disminución del coeficiente estático de torque, se debe a los aportes positivos/negativos por parte de los coeficientes de presión.

Gráfico N° 13: Coeficientes estáticos de torque obtenidos en [6] y calculados a partir de los coeficientes de presión, para un Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0,15 y número de Reynolds de 120.000.



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Se diseñó un aerogenerador Savonius (idéntico a [6]) de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0,15, y se obtuvieron las presiones totales promedio en puntos en la sección media, mediante simulaciones en SolidWorks Flow Simulation® empleando un número de Reynolds de 120.000. Con el método de cálculo propuesto por [6, 9, 10], se hallaron los coeficientes estáticos de torque y se compararon con los resultados obtenidos experimentalmente por Kamoji, Kedare y Prabhu [6].

Se observó que los coeficientes de presión muestran tendencias similares y órdenes de magnitud comparables con los resultados obtenidos experimentalmente por Kamoji, Kedare y Prabhu. Estas diferencias pueden reducirse con el ajuste de los parámetros de simulación. Ello implicaría, cambiar las condiciones de mallado y dominio computacional principalmente, con el objetivo de mejorar la calidad de los resultados. Se verificó que las

tendencias de las curvas se encuentran en el mismo orden de magnitud pero desfasados respecto de los modelos experimentales, para los coeficientes locales estáticos y los coeficientes estáticos de torque. Esto puede deberse al sistema de referencia tomado en los modelos [6, 9, 10].

Por otro lado, para hallar la relación de superposición óptima de los álabes, se pueden evaluar los coeficientes estáticos de torque. Por lo tanto, utilizando el método propuesto [6, 9 y 10], se pueden realizar simulaciones con distintas configuraciones de Savonius y evaluar los resultados de los coeficientes estáticos de torque [6, 21]. La relación de superposición óptima de los álabes será aquella de la cual se obtengan los valores más altos, positivos y mejor distribuidos de los coeficientes estáticos de torque. Además, al trazar el coeficiente estático de torque en función del ángulo de rotor, para diferentes geometrías de Savonius, se pueden comparar las capacidades de autoarranque de estos modelos [25].

BIBLIOGRAFIA

- [1] Secretaria de Energía. (2008). Energías renovables, Energía Eólica.
- [2] Dobrev, I. & Massouh, F. (2012). Exploring the Flow around a Savonius Wind Turbine. 16th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 09-07-2012 Lisbon (Portugal), pp.1-9.
- [3] Salyers, T. E. (2016). Experimental and Numerical Investigation of Aerodynamic Performance for Vertical-Axis Wind Turbine Models with Various Blade Designs. Georgia Southern University, Electronic Theses and Dissertations.
- [4] Akwa, J. V., Vielmo, H. A., & Petry, A. P. (2012). A review on the performance of Savonius wind turbines. Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, pp. 3054-3064.
- [5] Sadrul Islam, A., Quamrul Islam, M., Mandal, A., & Razzaque, M. (1993). Aerodynamic characteristics of a Stationary Savonius Rotor. RERIC, International Energy Journal 15, pp. 125-136.
- [6] Kamoji, M. A., Kedare, S. B. & Prabhu, S. V. (2008). Experimental Investigations on the Effect of Overlap Ratio and Blade Edge Conditions on the Performance of Conventional Savonius Rotor. Wind engineering, vol. 32, no. 2, pp. 163-178.
- [7] Fujisawa, N. & Gotoh, F. (1994). Experimental Study on the Aerodynamic Performance of a Savonius Rotor. ASME journal of solar energy engineering, vol. 116, pp. 148-152.
- [8] Fernando, M.S.U.K. (1987). On the Performance and Wake Aerodynamics of the Savonius Wind Turbine. The University of British Columbia.

- [9] Fujisawa, N. (1992). On the torque mechanism of Savonius rotors. Elsevier, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 40, pp. 277–292.
- [10] Fujisawa, N. & Gotoh, F. (1992). Pressure measurements and flow visualization study of a Savonius rotor. Elsevier, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 39, pp. 51-60.
- [11] Modi, V. J. & Fernando, M.S.U.K. (1989). On the Performance of the Savonius Wind Turbine. ASME journal of solar energy engineering, vol. 111, pp. 71-81.
- [12] Amiri, M., Kahrom, M. & Teymourash, A. R. (2019). Aerodynamic Analysis of a Three-Bladed Pivoted Savonius Wind Turbine: Wind Tunnel Testing and Numerical Simulation. Journal of Applied Fluid Mechanics, vol. 12, no. 3, pp. 819-829.
- [13] Hassanzadeh, A. R., Yaakob, O., Yasser, M. A. & Ismail, M.A. (2013). Comparison of Conventional and Helical Savonius Marine Current Turbine Using Computational Fluid Dynamics. World Applied Sciences Journal 28, pp. 1113-1119.
- [14] Nasef, M.H., El-Askary, W.A., AbdEL-hamid, A.A. & Gad, H.E. (2013). Evaluation of Savonius rotor performance: Static and dynamic studies. Elsevier, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 123, pp. 1-11.
- [15] D'Alessandro, V., Montelpare, S., Ricci, R. & Secchiaroli, A. (2010). Unsteady Aerodynamics of a Savonius wind rotor: a new computational approach for the simulation of energy performance. Elsevier, Energy 35, pp. 3349-3363.
- [16] Yaakob, O., Ahmed, Y.M. & Ismail, M.A. (2012). Validation Study for Savonius Vertical Axis Marine Current Turbine Using CFD Simulation. The 6th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics (APHydro2012), CFD in Hydrodynamics, 3-4/09/2012, Malaysia, pp. 327-332.
- [17] Yaakob, O.B., Tawi, K.B. & Sunanto, D.T.S. (2010). Computer Simulation Studies on the Effect Overlap Ratio for Savonius Type Vertical Axis Marine Current Turbine. IJE Transactions A: Basics, vol. 23, no. 1, pp. 79-88.
- [18] Widodo, W.S., Chin, A.C., Haeryip Sihombing & Yuhazri, M.Y. (2012). Design and Analysis of 5 kW Savonius Rotor Blade. Global Engineers & Technologists Review, vol.2, no.8, pp. 1-8.
- [19] Chávez-Cano, O., Muñoz-Hernández, G.A., Turiján-Altamirano, S.N. & Rodríguez-González, J. (2019). Design and simulation of a vertical wind generator. Journal of Technology and Innovation, vol.6, no.18, pp. 27-33.

- [20] Driss, Z., Mlayeh, O., Driss, D., Maaloul, M. & Abid, M.S. (2015). Incidence Angle Effect on the Aerodynamic Structure of an Incurved Savonius Wind Rotor. Multiphysics Modelling and Simulation for Systems Design and Monitoring, Applied Condition Monitoring 2, pp. 101-110.
- [21] Olaoye, O. S. & Adeoye, O. (2016). Numerical Investigation and Improvement of Aerodynamic Performance of Savonius Wind Turbine. Iiste, Journal of Energy Technologies and Policy 6, pp. 34-43.
- [22] Akwa, J.V., Alves da Silva Júnior, G. & Petry, A.P. (2012). Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics. Elsevier, Renewable Energy 38, pp. 141-149.
- [23] Jaohindy, P., McTavish, S., Garde, F., Bastide, A. (2013). An analysis of the transient forces acting on Savonius rotors with different aspect ratios. Elsevier, Renewable Energy 55, pp. 286-295.
- [24] McTavish, S., Feszty, D. & Sankar, T. (2012). Steady and rotating computational fluid dynamics simulations of a novel vertical axis wind turbine for small-scale power generation. Elsevier, Renewable Energy 41, pp. 171-179.
- [25] Zhao, D., Han, N., Goh, E., Cater, J. & Reinecke, A. (2019). Chapter 2 - 3D-printed miniature Savonius wind harvester. Elsevier, Wind Turbines and Aerodynamics Energy Harvesters, pp. 21-165.
- [26] Menet, J.-L. & De Rezende, T. (2013). Static and dynamic study of a conventional Savonius rotor using a numerical simulation. 21ème Congrès Français de Mécanique.