

# Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad  
Michoacana  
de San Nicolás  
de Hidalgo

## Análisis del rotor de una turbina eólica de eje vertical híbrida H-Savonius mediante dinámica de fluidos computacional

## Analysis of the rotor of an H-Savonius hybrid vertical axis wind turbine using computational fluid dynamics

Gerardo Javier Marín Téllez\*, Víctor López Garza, Gildardo Solorio Díaz, J. Jesús Pacheco Ibarra

**Para citar este artículo:** Marín Téllez GJ, López Garza V, Solorio Díaz G, Pacheco Ibarra JJ (2024). Análisis del rotor de una turbina eólica de eje vertical híbrida H-Savonius mediante dinámica de fluidos computacional. *Ciencia Nicolaita* no. 90: 72-85.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.734>

### Historial del artículo



Recibido: 16 de agosto de 2023

Aceptado: 18 de diciembre de 2023

Publicado en línea: abril 2024



Ver material suplementario



\*Correspondencia de autor: [gerardo.marin@umich.mx](mailto:gerardo.marin@umich.mx)



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

# Análisis del rotor de una turbina eólica de eje vertical híbrida H-Savonius mediante dinámica de fluidos computacional

## Analysis of the rotor of an H-Savonius hybrid vertical axis wind turbine using computational fluid dynamics

Gerardo Javier Marín Téllez\*, Víctor López Garza, Gildardo Solorio Díaz, J. Jesús Pacheco Ibarra

Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

### Resumen

La simulación es una herramienta versátil y potente para el diseño que permite anticiparse al comportamiento real de los diversos fenómenos físicos, evaluarlos y analizarlos para obtener su mejor configuración. Esta investigación tiene como objetivo validar el diseño de una turbina eólica de eje vertical (VAWT) del Centro de Investigación y Asistencia Técnica del Estado de Querétaro (CIATEQ) mediante su simulación CFD en 2D para estimar el coeficiente de potencia ( $C_p$ ), el torque y la potencia generada de la turbina para una velocidad del viento uniforme de 7m/s. La turbina del CIATEQ corresponde a un diseño innovador híbrido H-Savonius de baja capacidad. El dimensionamiento del dominio computacional siguió recomendaciones de la literatura, utilizando mallas estructuradas y no estructuradas. Aparte del análisis de independencia de malla, la estrategia de simulación incluyó la inicialización RANS en estado estacionario mediante la técnica Single Frame Motion y simulaciones URANS en estado no estacionario empleando la técnica de Sliding Mesh, modelando el aire por medio de modelos de turbulencia  $k-\omega$  SST de dos ecuaciones (SST) y SST de 4 ecuaciones (TSST), respectivamente. Se logró afirmar la fiabilidad de la metodología de simulación en 2D, correlacionando los resultados con la literatura a pesar de la falta de datos experimentales. Los resultados indican un comportamiento sinusoidal del torque del rotor H y de la turbina híbrida, y un torque neto negativo para la turbina Savonius, validado con la literatura. Además, la turbina eólica de eje vertical exhibe una potencia de 200.1W y un  $C_p$  de 0.245, alineándose con las expectativas. El estudio proporciona perspectivas sobre el rendimiento de la turbina, validando el enfoque de simulación y destacando su potencial para investigaciones y refinamientos en el diseño.

**Palabras clave:** VAWT, CFD, Sliding Mesh, Turbina híbrida H-Savonius, Simulación

## Abstract

Simulation is a versatile and powerful tool when designing, since it allows the anticipation, evaluation and analysis of the real behavior of various physical phenomena to obtain their optimal configuration. This research aims to validate a vertical-axis wind turbine (VAWT) designed by the Technical Assistance and Research Center of Queretaro State (CIATEQ) by means of a 2D CFD simulation, estimating the power coefficient ( $C_p$ ), torque and generated power of the turbine at a uniform wind speed of 7m/s. The CIATEQ turbine corresponds to an innovative low-capacity H-Savonius hybrid design. The computational domain sizing was defined by literature recommendations and used both structured and unstructured meshes. Besides mesh independence analysis, the simulation strategy included RANS steady-state initialization using the Single Frame Motion technique and unsteady-state URANS simulations using the Sliding Mesh technique, modeling the air with a two-equation  $k-\omega$  SST turbulence model (SST) and a four-equation SST transition model (TSST), respectively. The reliability of the 2D simulation methodology was confirmed by correlating the results with the literature despite the lack of experimental data. The results indicate that both the H rotor and the hybrid rotor display a sinusoidal torque behavior, whereas the Savonius turbine exhibits a net negative torque; both behaviors are validated by the literature. Additionally, the VAWT presents a generated power of 200.1W and a  $C_p$  of 0.245, aligning with expectations. The study provides insights into turbine performance, validating the simulation approach and highlighting its potential for further research and design refinements.

**Keywords:** VAWT, CFD, Sliding Mesh, H-Savonius hybrid turbine, Simulation

## Introducción

En el 2019, el Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Jalisco (COECYTJAL) en conjunto con el Centro de Investigación y Asistencia Técnica del Estado de Querétaro (CIATEQ), participaron en la convocatoria del Fondo de Desarrollo Científico de Jalisco (FODECIJAL) para Atender Problemas Estatales con el proyecto “Diseño y desarrollo de turbina eólica de eje vertical para ambientes urbanos”, en la cual su proyecto fue seleccionado (CIATEQ, 2020).

En el marco de este proyecto, se le extendió una invitación al programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica de la UMSNH a colaborar en la simulación mediante software CFD de la turbina eólica diseñada por el CIATEQ. Parte del trabajo de investigación realizado, se presenta en este artículo.

El rango operativo de la turbina es de 2.5 m/s a 10 m/s, el presente trabajo se centra en desarrollar la simulación para una velocidad de entrada de viento uniforme de 7 m/s, empleando la técnica Sliding Mesh para estimar el  $C_p$  (coeficiente de

potencia) y potencia generada por la turbina (ANSYS Inc., 2021b). La técnica de Sliding Mesh implica el uso de dos mallas, denominadas “rotor” y “estator”. En la malla “rotor”, se encuentra la geometría del rotor de la turbina eólica y es la que tendrá movimiento a una determinada velocidad angular; en cambio, la malla “estator” es estática (Tu *et al.*, 1995).

Las simulaciones son una aproximación de la realidad, que permiten una mejor comprensión de los fenómenos físicos al ofrecer más datos y una gran facilidad para visualizarlos en comparación con la experimentación (Versteeg y Malalasekera, 2007). La técnica de Sliding Mesh se basa en girar el rotor a una velocidad angular programada y ofrece resultados confiables cuando esta velocidad es idéntica o próxima a la velocidad angular real (Marin Tellez, 2022). Sin embargo, se recomienda el uso de otra técnica de simulación, como las mallas dinámicas, para predecir con mayor certeza el desempeño de una turbina y obtener mayor variedad de datos, como la velocidad angular de la turbina para determinada velocidad de viento

(ANSYS Inc., 2021a).

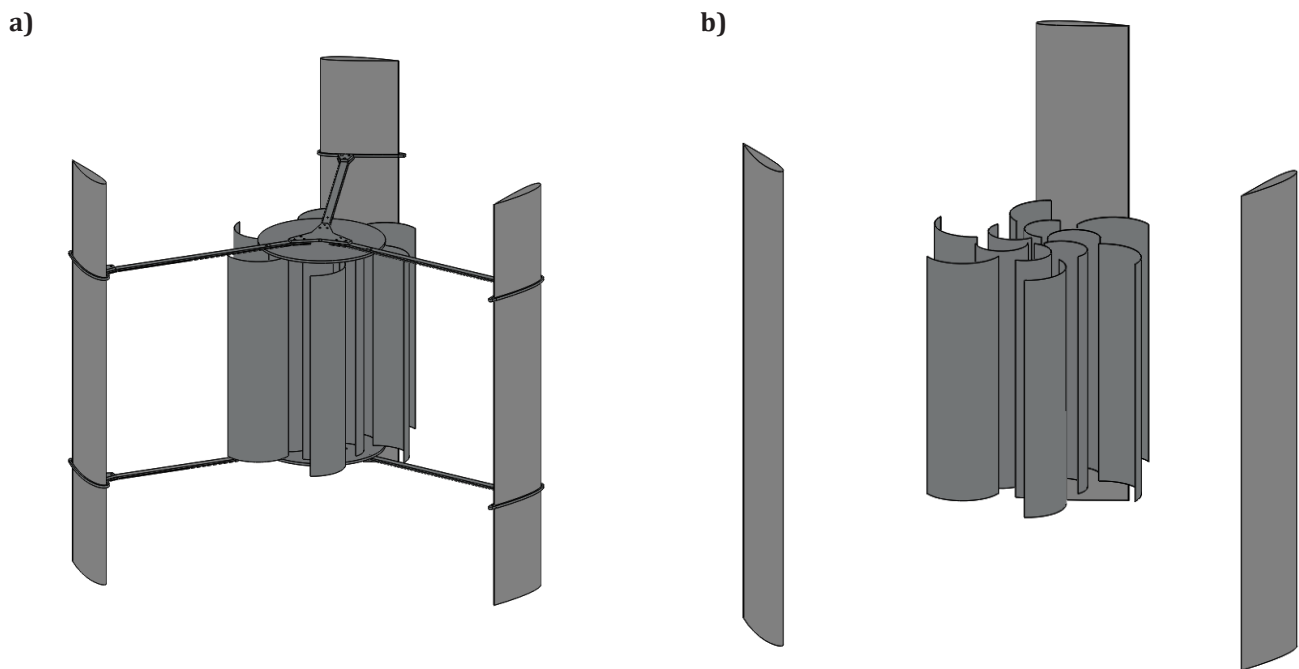
Las simulaciones se pueden realizar tanto en dos dimensiones (2D) como en tres (3D). No obstante, las simulaciones en 3D no son recomendadas para fines de diseño debido a que demandan una gran cantidad de tiempo y recursos computacionales, lo que ha llevado históricamente a los investigadores a emplear modelos de 2D (Franchina *et al.*, 2019). Las mallas computacionales empleadas en la mayoría de los estudios en 3D parecen bastante toscas si se comparan con sus contrapartes en 2D debido a las restricciones por el costo computacional. Desde una perspectiva técnica, los modelos 2D permiten capturar los efectos físicos relevantes de la dinámica de fluidos; sin embargo, estos modelos tienden a sobrestimar la potencia generada por la turbina y su coeficiente de potencia,  $C_p$ , que se define como la relación de la potencia generada por el rotor entre la potencia disponible del viento (Franchina *et al.*, 2019; Letcher, s/f).

La confiabilidad de los resultados obtenidos se fundamenta en varios aspectos, entre los cuales se incluyen la malla del dominio computacional, el modelo de turbulencia, el tipo de simulación (dependiente del tiempo o no dependiente del tiempo) y la técnica de simulación (Sliding Mesh, Dynamic Mesh, Single Reference Frame).

Preferentemente, se debe validar la simulación con datos experimentales; sin embargo, ante la falta de datos experimentales, la simulación realizada se respalda fuertemente en la literatura (Marin Tellez, 2022). El objetivo de la presente investigación es corroborar el diseño de la turbina propuesta por CIATEQ mediante la simulación del rotor de la turbina en 2D, obteniendo la potencia generada para la velocidad de viento uniforme de 7 m/s y el coeficiente de potencia  $C_p$ . Además, se busca demostrar que, ante la falta de datos experimentales, la validación de simulaciones de turbinas eólicas de eje vertical se puede basar fuertemente en la literatura.

## Materiales y métodos

CIATEQ proporcionó el modelo geométrico de la turbina, algunos parámetros de diseño y la ubicación donde será instalada. La turbina eólica evaluada es un diseño híbrido H-Savonius, y consta de dos rotores: un rotor H y un rotor Savonius; la **Figura 1a** muestra todos los detalles geométricos. El rotor H está compuesto por tres álabes rectos con un perfil asimétrico NACA2415 (Airfoil Tools, 2022) distribuidos uniformemente, tiene una



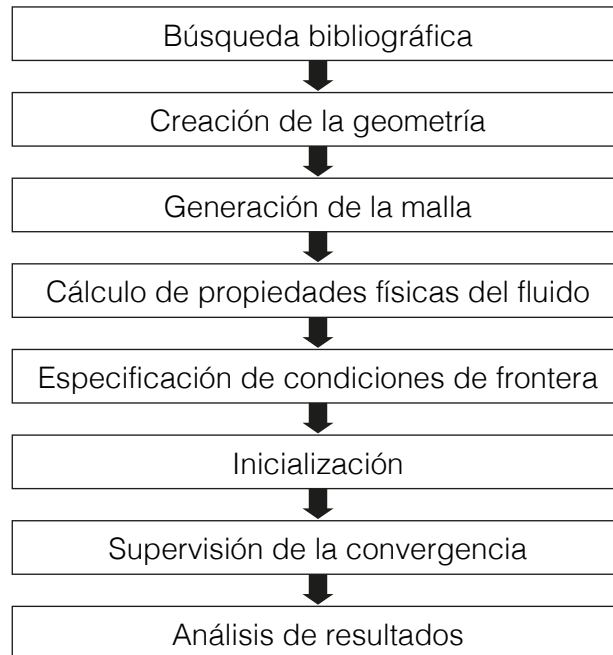
**Figura 1.** a) Vista dimétrica del rotor de la turbina H-Savonius con los elementos de soporte y sujeción. b) Vista dimétrica del rotor H-Savonius sin los elementos de soporte y sujeción.

altura de 2 m y un diámetro de 2.4 m. El rotor tipo Savonius cuenta con un total de 12 álabes semicirculares, distribuidos en dos niveles; cada nivel tiene 6 álabes (**Figura 1b**) y está ubicado en el centro del rotor. Tiene una altura de 1 m y un diámetro de 96 cm.

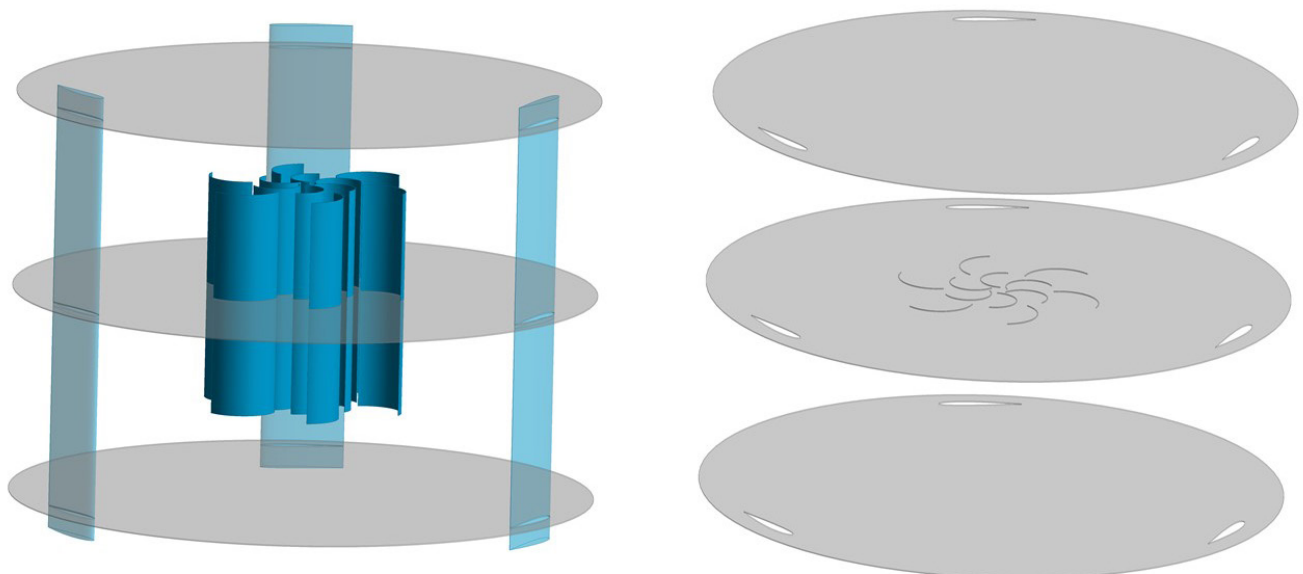
La ubicación de la turbina eólica será en la sede de CIATEQ Zapopan, Jalisco, México. El fluido de trabajo es el aire. La literatura especializada para simulaciones de turbinas eólicas de eje vertical

(VAWT) de baja potencia indican que el aire se modela en régimen turbulento e incompresible (Franchina *et al.*, 2019).

La metodología empleada para el desarrollo del proyecto es la que comúnmente se emplea para la resolución de problemas con CFD (Tu *et al.*, 1995) y se ilustra en la **Figura 2**. No se cuenta con datos experimentales del rotor eólico, por lo que para validar la simulación se debe apegar obligatoriamente a las recomendaciones marcadas



**Figura 2.** Metodología para el desarrollo de la investigación.



**Figura 3.** Planos perpendiculares al eje de rotación de la turbina híbrida.

en la literatura y al uso de las buenas prácticas. Así mismo, se añadió al proceso de trabajo la validación de la configuración del solucionador de CFD mediante la simulación de una turbina eólica reportada en la literatura que contara tanto con datos experimentales (Tescione *et al.*, 2014) como con su respectiva simulación (Rezaeiha *et al.*, 2017). Para evitar problemas de compatibilidad entre softwares se realizan todas las actividades con el software de ANSYS Workbench.

## Resultados y discusión

### Creación de la geometría

Se realizó una primera simplificación quitando todos los elementos de soporte que no contribuyeran o afectaran de forma sustancial a la aerodinámica de la turbina, dejando únicamente los 12 álabes de la turbina Savonius y los 3 álabes de la turbina H. El rotor simplificado se muestra en la **Figura 1b**. La simplificación se realizó para ahorrar recursos computacionales. Se puede apreciar en la **Figura 3** que la turbina híbrida no mantiene la misma sección a lo largo del eje de rotación, debido a las distintas alturas de los rotores.

Para calcular la potencia y el  $C_p$  de la turbina híbrida se emplearon dos simulaciones, la primera simuló la turbina híbrida, sección central, en 2D bajo la suposición de que la altura de ambos rotores (H y Savonius) es de 1 m y la segunda correspondió a la parte restante de la turbina (0.5 m del rotor

H superior a la sección de la turbina híbrida y 0.5 m del rotor H inferior a la sección de la turbina híbrida) y se aproximó mediante la simulación en 2D de un rotor H con una altura de 1 m (**Figura 4**).

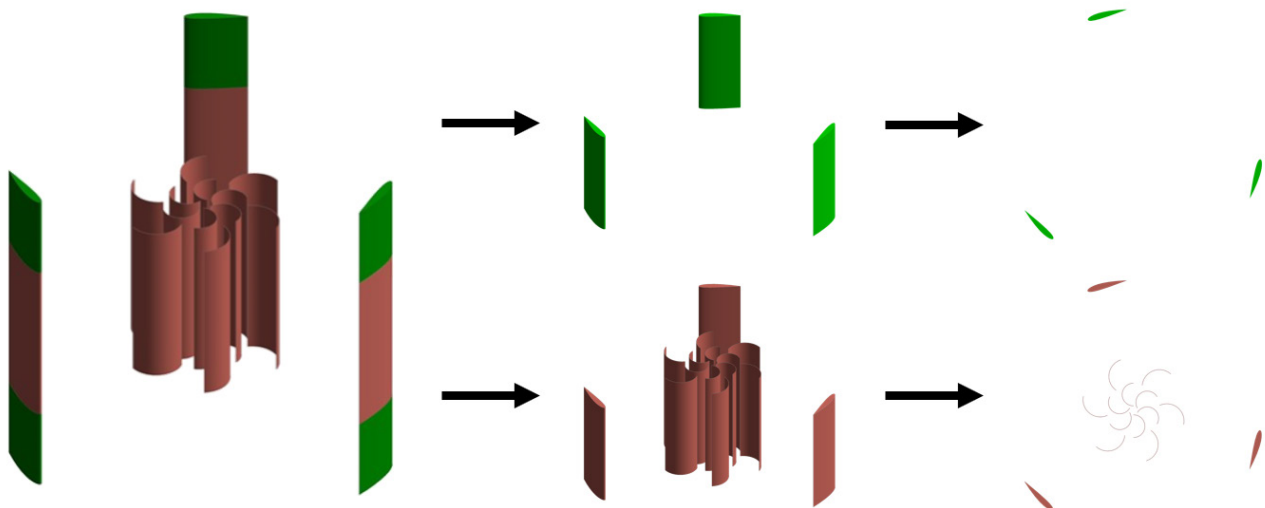
El dimensionamiento del dominio computacional se realizó con base en una amplia búsqueda en la literatura (Durrani *et al.*, 2011; Ghasemian *et al.*, 2017; Hosseini y Goudarzi, 2019; Lam y Peng, 2016; Liang *et al.*, 2017; Orlandi *et al.*, 2015; Ostos *et al.*, 2019a; Rezaeiha *et al.*, 2017, 2018b, 2019; Untaroiu *et al.*, 2011; Zhu *et al.*, 2015), utilizando principalmente las recomendaciones de Rezaeiha *et al.* (2017). El diámetro del dominio para el rotor fue de  $1.5 D$ . Para el estator se hizo un rectángulo con un hueco circular; las dimensiones utilizadas se muestran en la **Figura 5**, siendo  $D$  el diámetro del rotor. Las diferentes partes del dominio del rotor y del estator se nombraron como se muestra en la **Figura 6**.

### Generación de la malla

Se elaboraron tres mallas para el rotor y tres mallas para el estator, con base en las cuales se evaluaron distintas combinaciones para realizar el estudio de independencia de malla. El número de elementos y nodos de encuentran en la **Tabla 1**.

Se elaboraron 5 combinaciones de malla a partir de las tres mallas para el rotor y las tres mallas para el estator (**Tabla 2**).

Para mallar el dominio computacional del estator se usó una malla estructurada con elementos



**Figura 4.** Proceso de simplificación para la simulación de la turbina híbrida en 2D.

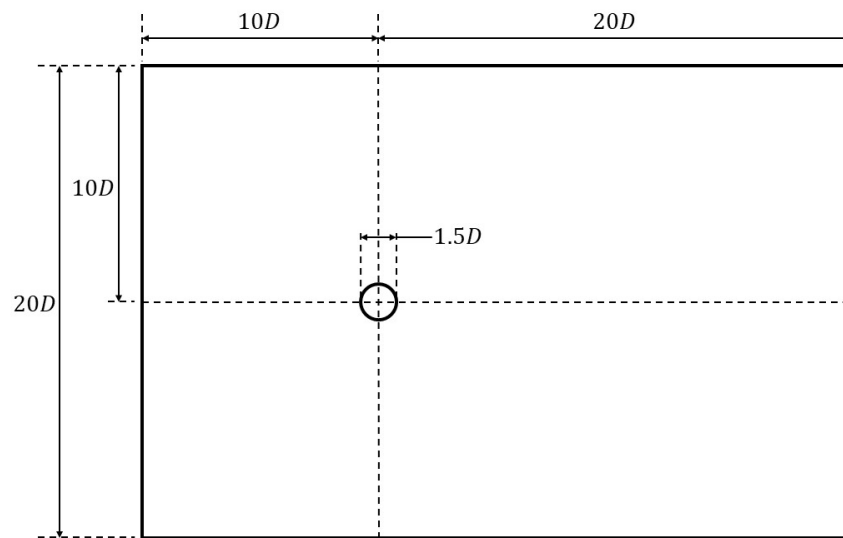


Figura 5. Plano del dominio computacional del estator.

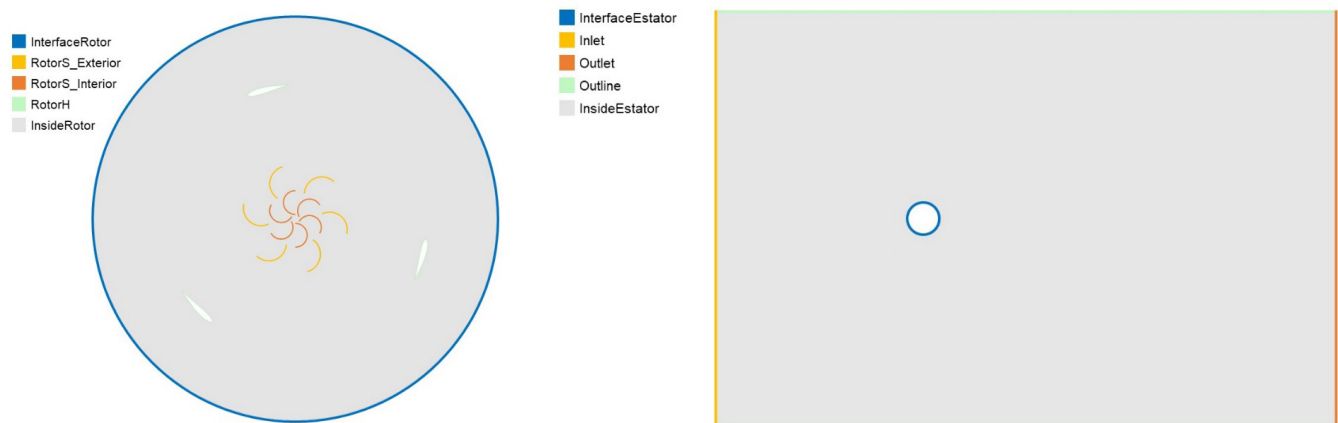


Figura 6. Nomenclatura del dominio computacional del rotor (izquierda) y dominio computacional del estator (derecha).

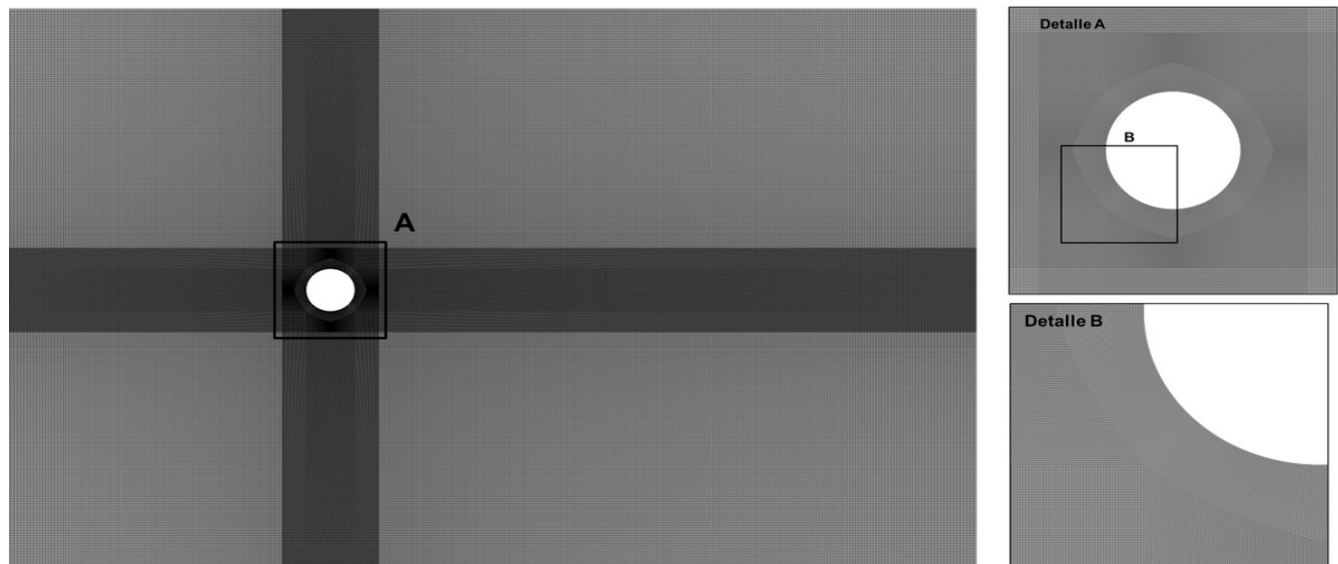


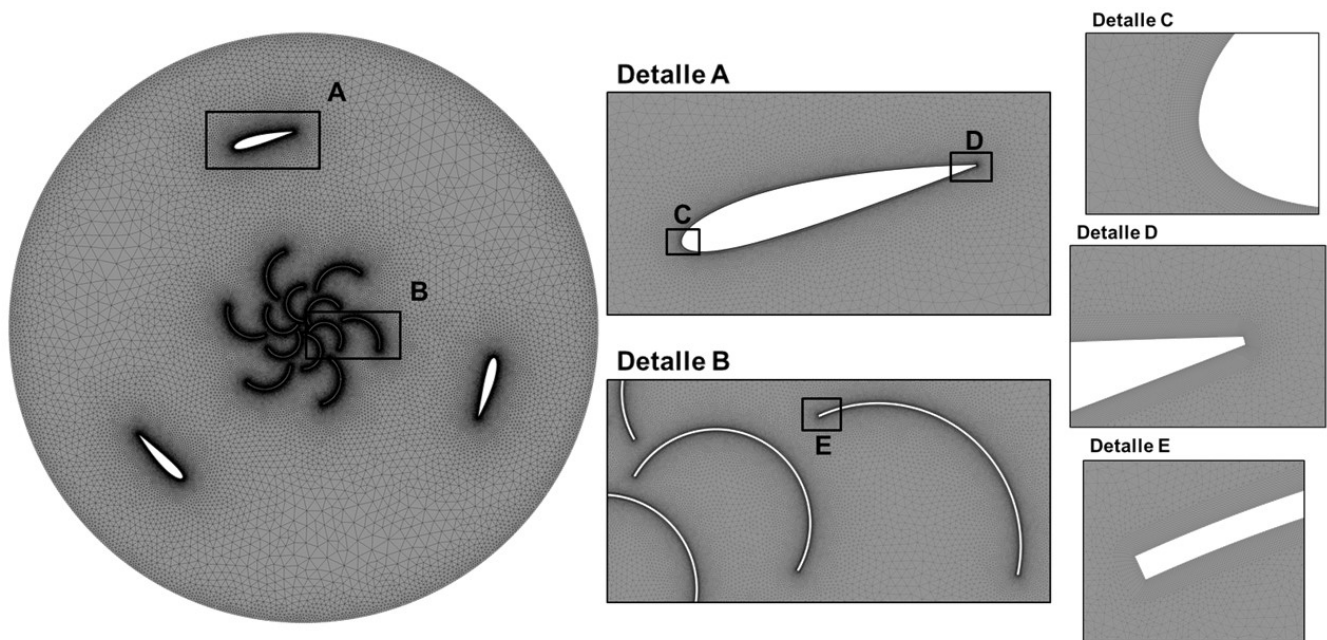
Figura 7. Malla del estator con detalles del refinamiento de malla, malla E1.

**Tabla 1.** Número de elementos y nodos para cada malla del estator y cada malla del rotor.

| Malla               | Estator |         |        | Rotor     |         |         |
|---------------------|---------|---------|--------|-----------|---------|---------|
|                     | E1      | E2      | E3     | R1        | R2      | R3      |
| Número de elementos | 364,068 | 151,364 | 62,664 | 1,051,697 | 585,542 | 487,467 |
| Número de nodos     | 365,560 | 152,288 | 63,256 | 830,219   | 517,202 | 428,569 |

**Tabla 2.** Combinación de mallas de rotor y estator para la simulación de la turbina híbrida.

| Malla             | 1         | 2       | 3       | 4       | 5       |
|-------------------|-----------|---------|---------|---------|---------|
| Malla Rotor       | R1        | R2      | R3      | R2      | R2      |
| Malla Estator     | E1        | E1      | E1      | E2      | E3      |
| Núm. de elementos | 1,415,765 | 949,610 | 851,535 | 736,906 | 645,206 |

**Figura 8.** Malla del rotor con detalles del refinamiento de malla, malla R1.

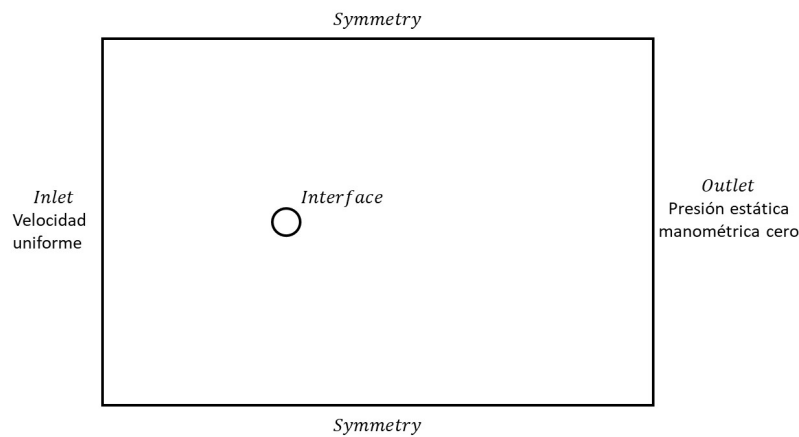
cuadráticos, refinado en la zona próxima a InterfaceEstator (**Figura 7**).

Para el dominio computacional del rotor, se empleó una malla no estructurada con elementos triangulares y rectangulares. Se refinó la malla cerca de los álabes (RotorH, RotorS\_Interior y RotorS\_Exterior) y en el límite del dominio (InterfaceRotor) (**Figura 8**). Se utilizó una inflación con los elementos rectangulares en las paredes de los álabes. Para las simulaciones se usó un  $y^+ \approx 1$  (Kacprzak y Sobczak, 2014; Ostos *et al.*, 2019b; Rezaeiha *et al.*, 2018b).

### **Cálculo de las propiedades físicas del fluido**

La densidad del aire se calculó siguiendo el procedimiento descrito por Manwell *et al.* (2009), quien indica que el aire se puede considerar como un gas ideal, por lo que su densidad está en función de la temperatura anual promedio y la presión atmosférica, la cual a su vez está en función de la altitud del lugar de instalación de la turbina. Se obtuvo un valor de  $\rho_{aire} = 0.99036 \text{ kg/m}^3$ . La temperatura anual promedio del sitio de instalación se determinó con los datos de temperatura de los años 2000 al 2014 obtenidos del Sistema CLICOM (CICESE, 2021) de la estación Guadalajara (DGE) con Id:14066. La temperatura anual promedio es





**Figura 9.** Condiciones de frontera.

de  $T_{promedio} = T = 20.99 \text{ }^\circ\text{C} \approx 21 \text{ }^\circ\text{C}$ . Además, se empleó la ley de Sutherland (CRANE, s/f) para obtener la viscosidad  $\mu = 0.000018188 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ .

### Especificación de condiciones de frontera

En las zonas nombradas como RotorH, RotorS\_ Interior y RotorS\_ Exterior, correspondientes a los álabes de la turbina, se impuso una condición de paredes antideslizantes (no-slip wall condition), se creó una interface en las zonas denominadas InterfaceRotor e InterfaceEstator, y se impusieron las condiciones de frontera ilustradas en la **Figura 9** (Balduzzi *et al.*, 2017; Dobrev y Massouh, 2011; Durrani *et al.*, 2011; ed-Dîn Fertahi *et al.*, 2018; Franchina *et al.*, 2019; Hosseini y Goudarzi, 2019; Kacprzak y Sobczak, 2014; Lam y Peng, 2016; Liang *et al.*, 2017; Lositaño y Danao, 2019; Mauro *et al.*, 2019; Ostos *et al.*, 2019a; Qin *et al.*, 2011; Rezaeiha *et al.*, 2017, 2018b, 2018a; Tirandaz y Rezaeiha, 2021; Zhu *et al.*, 2015).

### Inicialización del modelo

Se inició el estudio con una simulación de flujo en estado estacionario con la técnica de Single Reference Frame (Frame Motion). Posteriormente, se hizo la simulación de flujo en estado no estacionario con la técnica de Sliding Mesh. La inicialización de la simulación RANS del rotor con la técnica de Frame Motion se usó con el modelo de turbulencia  $k-\omega$  SST de dos ecuaciones (SST). Para la simulación URANS del rotor con la técnica de Sliding Mesh se usó el modelo de turbulencia de 4 ecuaciones SST de transición (TSST). Se emplearon los modelos anteriormente mencionados debido a que son modelos robustos que son ampliamente

utilizados en simulaciones de VAWT y por las recomendaciones de trabajos especializados como el de Rezaeiha *et al.* (2019).

Con los datos proporcionados por CIATEQ para el rotor H ( $TSR = 3$  y  $r = D/2 = 1.2 \text{ m}$ ), la velocidad del viento a evaluar ( $7 \text{ m/s}$ ) y despejando la velocidad angular de la definición de TSR, ( $\omega = [TSR \cdot V_\infty] / r$ ), se calculó la velocidad angular  $\omega = 17.5 \text{ rad/s}$ .

El paso de tiempo para el caso de turbinas eólicas con la revolución de la turbina se tiende a correlacionar y expresar como incremento azimutal,  $d\theta$ . El incremento azimutal se define como el número de grados que gira la turbina por paso de tiempo (Rezaeiha *et al.*, 2018b). Se utiliza un incremento azimutal de  $0.5^\circ$  con base en Rezaeiha *et al.* (2017).

### Supervisión de la convergencia

El esquema numérico usado para la técnica Frame Motion es Coupled, y para la de Sliding Mesh, SIMPLE. El solucionador utilizado es *pressure-based* con una discretización de segundo orden tanto para el esquema espacial como para el temporal. En la simulación de flujo en estado estacionario se consideró solamente los residuales para establecer la convergencia, con un criterio mínimo de convergencia de  $1 \cdot 10^{-5}$  para todos los residuales (Tu *et al.*, 1995).

En la simulación en estado no estacionario, la convergencia se define con base en el número de revoluciones de la turbina antes de alcanzar una condición estadística de estado estable (Balduzzi *et al.*, 2016). La complejidad del flujo para los VAWT varía en función de las condiciones geométricas y de funcionamiento del rotor para cada turbina (solidez y TSR), por lo que no existe un número de

revoluciones en particular para alcanzar la solución (Balduzzi *et al.*, 2016). El criterio de convergencia más usado en la literatura es comparar el valor promedio del torque de una revolución completa entre dos revoluciones sucesivas. En la mayoría de los trabajos, las simulaciones se detienen cuando esta diferencia es inferior al 1% (Balduzzi *et al.*, 2016). Se usó como criterio de convergencia el valor de 0.5% de diferencia entre el valor promedio del torque de una revolución y sus dos revoluciones sucesivas. El criterio se cumplió entre la décima séptima y decima novena revolución, dependiendo de la simulación. Los valores reportados en el presente trabajo corresponden a la vigésima quinta revolución, atendiendo también a la recomendación de Rezaeiha *et al.* (2018b), que establece un mínimo de 20 revoluciones como requisito de criterio de convergencia.

### Análisis de resultados

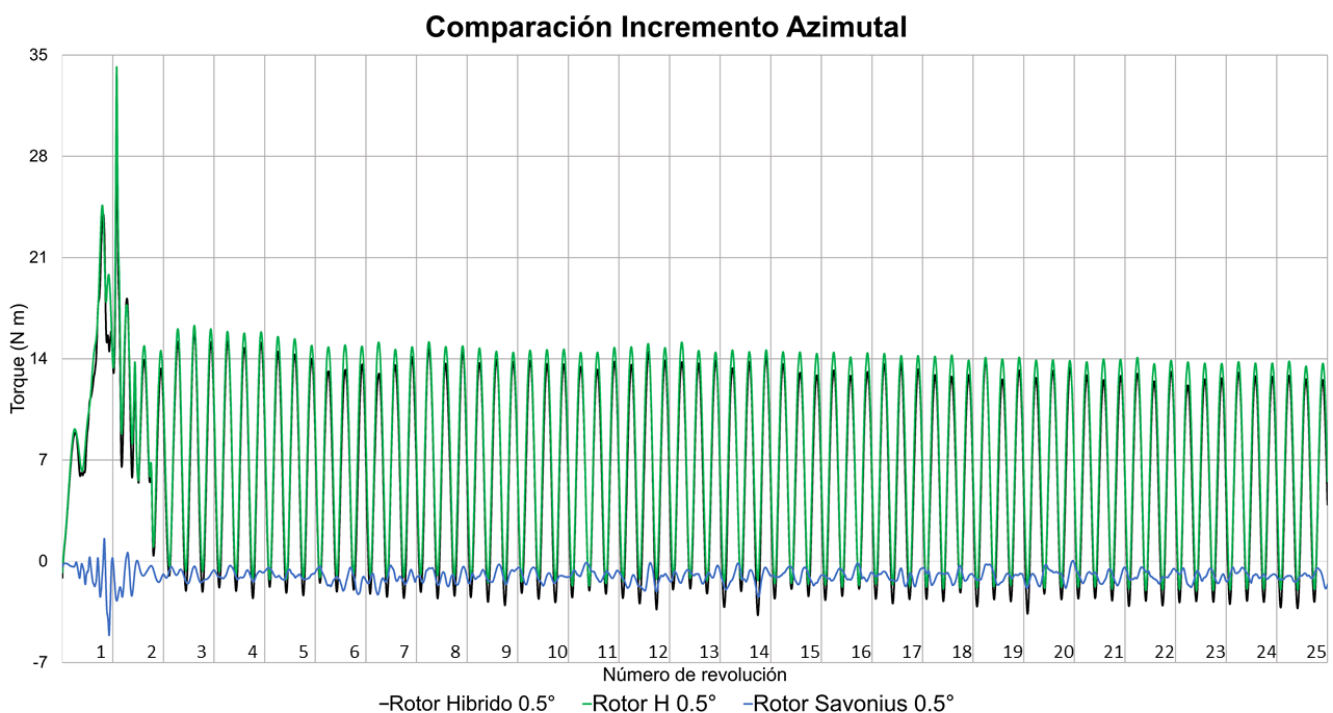
Durante una revolución de la turbina, el álabe, el ángulo de ataque y la velocidad relativa percibida por el perfil cambian continuamente, dando como resultado una fluctuación instantánea de las fuerzas y el par que actúan sobre la turbina (Franchina *et al.*, 2019). En la **Figura 10** se muestra el torque de la turbina desde el inicio de

la simulación con la técnica de Sliding Mesh hasta finalizar las 25 revoluciones.

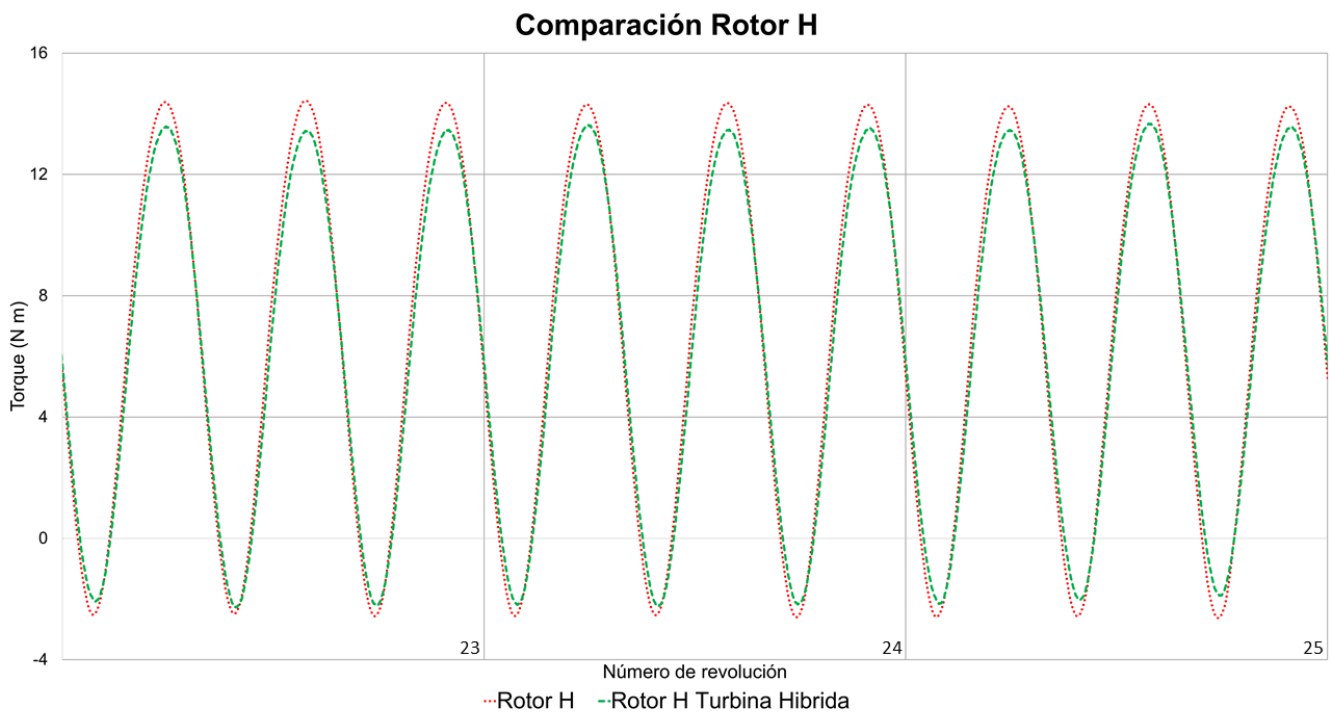
Se muestran tres líneas correspondientes al torque generado por el rotor H, el torque del rotor Savonius y el torque del rotor híbrido. El torque del rotor híbrido es la suma del torque del rotor H y el rotor Savonius. Así mismo, se observa un comportamiento sinusoidal repetitivo en el rotor H y el rotor híbrido a partir de la tercera revolución, en cambio en el rotor Savonius se observa que el torque permanece variado en un determinado rango.

La **Figura 11** muestra de forma comparativa los resultados de ambas simulaciones para el rotor H de la turbina híbrida y para la turbina H con un incremento azimutal de  $0.5^\circ$  en sus últimas tres revoluciones.

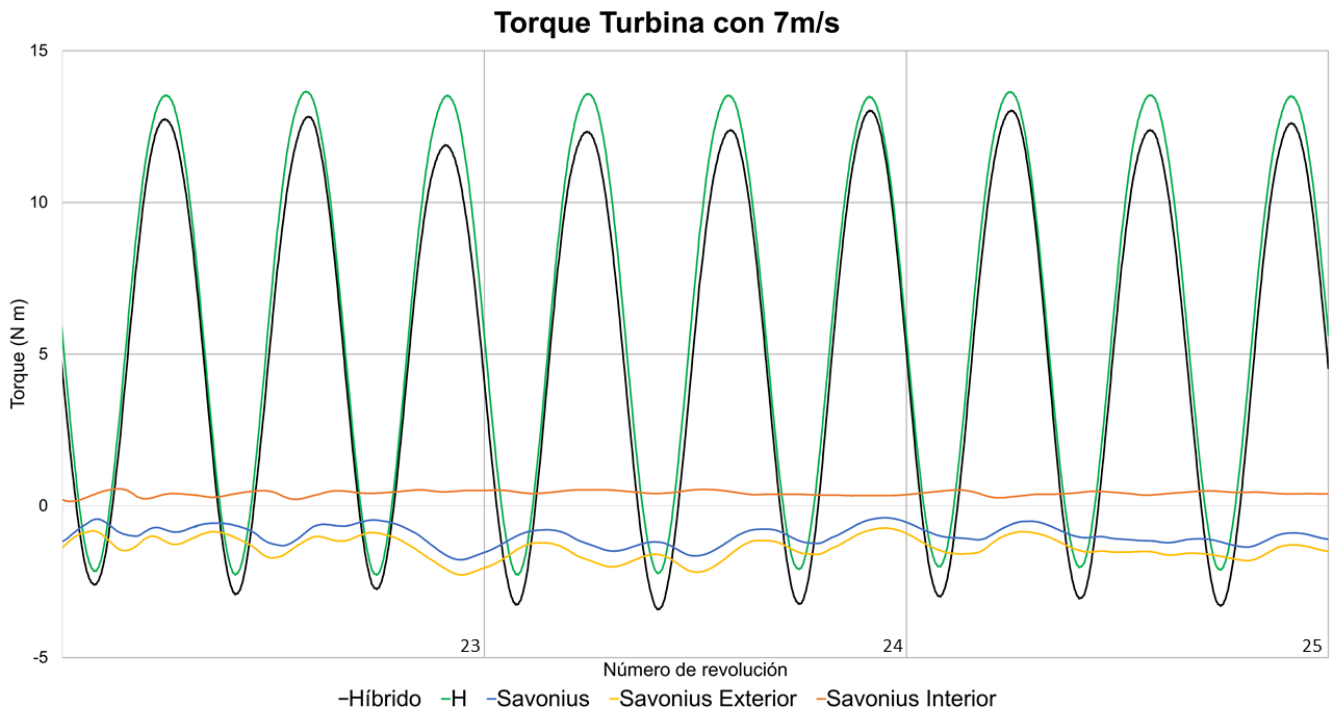
La diferencia más notoria es en los máximos y mínimos del torque. El torque de la turbina H es 2.09% mayor que el torque del rotor H de la turbina híbrida. Al ser una diferencia porcentual baja y para evitar una sobreestimación del torque de la turbina propia de las simulaciones en 2D se aproximó el torque total de la turbina híbrida completa mediante la suma del torque de la turbina híbrida y el torque del rotor H. La **Figura 12** muestra el torque de la turbina híbrida y sus rotores en las última tres revoluciones.



**Figura 10.** Torque simulado en 25 revoluciones con la malla 1 y con un incremento azimutal de  $0.5^\circ$ .



**Figura 11.** Comparación del torque generado por la turbina H y por el rotor H de la turbina híbrida en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5°.



**Figura 12.** Torque de la turbina híbrida en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad del viento de 7 m/s, con la malla 4.

Se observa un comportamiento predominante sinusoidal de la turbina híbrida debido a que predomina el comportamiento sinusoidal del rotor H. El torque de la turbina híbrida varía ligeramente

en sus picos máximos y mínimos debido a las fluctuaciones del rotor Savonius. El rotor Savonius proporciona un torque neto negativo; el torque neto se obtuvo con base en la suma del torque del



Savonius Interior y el del Savonius Exterior. El torque del Savonius Interior es positivo y tiende a tener un valor prácticamente constante en cada revolución en comparación con el torque generado por el Savonius Exterior que es negativo y fluctúa en mayor medida.

Para calcular la potencia de la turbina híbrida se obtuvo el torque total, es decir, la suma del torque de la turbina híbrida y del rotor H, y posteriormente se multiplicó por su velocidad angular, obteniendo una potencia de 200.1 W. Se calculó la potencia disponible del viento para una velocidad uniforme de viento de 7 m/s. Además, se determinó el  $C_p$ , el cual dio un valor de 0.245.

La simulación de esta turbina en particular se validó con base en los resultados reportados en la literatura, ya que no se contaba con datos experimentales. El rotor H genera el mayor torque y tiene forma de 3 ondas sinusoidales por revolución, lo que concuerda con lo mencionado en otros trabajos (Hau, s/f; Hosseini y Goudarzi, 2019; Lopez Mejia *et al.*, 2021; Lositaño y Danao, 2019; Shahizare *et al.*, 2016). Por otro lado, el torque del rotor Savonius no tiene una forma establecida y oscila en un rango de valor, y no se encontró un rotor similar reportado en la literatura por lo que no se cuenta con una gráfica de torque esperada con la cual comparar. No obstante, el rotor Savonius opera como un freno para la turbina híbrida (Bhuyan y Biswas, 2014), ya que genera un torque negativo bajo las condiciones de velocidad angular y velocidad del viento evaluadas. La potencia generada permanece debajo del límite de Betz (Hau, s/f; Manwell *et al.*, 2009) y el  $C_p$  de la turbina (0.245) se encuentra dentro de los rangos para turbinas eólicas de eje vertical (Hau, s/f).

## Conclusiones

Se evaluó el rendimiento de la VAWT diseñada por el CIATEQ mediante simulaciones 2D. La metodología propuesta sirvió para solventar la problemática que posaba trabajar con una turbina con cambio de sección transversal. A pesar de la falta de datos experimentales, la simulación del rotor de la turbina se considera confiable, ya que los resultados presentados concuerdan con lo reportado en la literatura. Según lo obtenido en las simulaciones, la turbina eólica de eje vertical tiene una potencia de 200.1 W y un  $C_p$  de 0.245; estos

valores se apegan a lo indicado en la literatura. Además, la forma de torque por revolución del rotor H y el comportamiento del rotor Savonius también se respaldan por la literatura.

## Referencias

- Airfoil Tools (2022). *Airfoil Tools*. <http://airfoiltools.com/index>
- ANSYS Inc. (2021a). *ANSYS FLUENT Theory Guide 2021-R2*. July.
- ANSYS Inc. (2021b). *ANSYS FLUENT Tutorial Guide*.
- Balduzzi F, Bianchini A, Maleci R, Ferrara G, Ferrari L (2016). Critical issues in the CFD simulation of Darrieus wind turbines. *Renewable Energy* 85: 419–435. doi:10.1016/j.renene.2015.06.048
- Balduzzi F, Drofelnik J, Bianchini A, Ferrara G, Ferrari L, Campobasso MS (2017). Darrieus wind turbine blade unsteady aerodynamics: a three-dimensional Navier-Stokes CFD assessment. *Energy* 128: 550–563. doi:10.1016/j.energy.2017.04.017
- Bhuyan S, Biswas, A. (2014). Investigations on self-starting and performance characteristics of simple H and hybrid H-Savonius vertical axis wind rotors. *Energy Conversion and Management* 87: 859–867. doi:10.1016/j.enconman.2014.07.056
- CIATEQ. (2020). *CIATEQ Bienvenidos*. <https://www.ciateq.mx/index.php/conoce-ciateq.html>
- CICESE. (2021). *CLICOM*. <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- CRANE. (s/f). *Flujos de Fluidos en Válvulas Accesorios y Tuberías*. McGRAW HILL.
- Dobrev I, Massouh, F. (2011). CFD and PIV investigation of unsteady flow through Savonius wind turbine. *Energy Procedia* 6: 711–720. doi:10.1016/j.egypro.2011.05.081
- Durrani N, Hameed H, Rahman H, Chaudhry S (2011). *A Detailed Aerodynamic Design and Analysis of a 2-D Vertical Axis Wind Turbine Using Sliding Mesh in CFD*. January, 1–16. doi:10.2514/6.2011-541
- ed-Dîn Fertahi S, Bouhal T, Rajad O, Kousksou T, Arid A, El Rhafiki T, Jamil A, Benbassou A (2018). CFD performance enhancement of a low cut-in speed current Vertical Tidal Turbine through the nested hybridization of Savonius and Darrieus. *Energy Conversion and Management* 169: 266–278. doi:10.1016/j.enconman.2018.05.027
- Franchina N, Persico G, Savini M (2019) 2D-3D Computations of a Vertical Axis Wind Turbine Flow Field: Modeling Issues and Physical Interpretations. *Renewable Energy* 136: 1170-

1189. doi:10.1016/j.renene.2018.09.086
- Ghasemian M, Ashrafi ZN, Sedaghat A (2017). A review on computational fluid dynamic simulation techniques for Darrieus vertical axis wind turbines. *Energy Conversion and Management* 149: 87–100. doi:10.1016/j.enconman.2017.07.016
- Hau E (s/f). *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics* (Second Edi). Springer.
- Hosseini A, Goudarzi N (2019) Design and CFD study of a hybrid vertical-axis wind turbine by employing a combined Bach-type and H-Darrieus rotor systems. *Energy Conversion and Management* 189: 49-59. doi:10.1016/j.enconman.2019.03.068
- Kacprzak K, Sobczak K (2014). Numerical analysis of the flow around the Bach-type Savonius wind turbine. *Journal of Physics: Conference Series* 530(1): 012063. doi:10.1088/1742-6596/530/1/012063
- Lam HF, Peng HY (2016). Study of wake characteristics of a vertical axis wind turbine by two- and three-dimensional computational fluid dynamics simulations. *Renewable Energy* 90: 386–398. doi:10.1016/j.renene.2016.01.011
- Letcher TM (s/f). *Wind Energy Engineering A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*.
- Liang X, Fu S, Ou B, Wu C, Chao CYH, Pi K (2017). A computational study of the effects of the radius ratio and attachment angle on the performance of a Darrieus-Savonius combined wind turbine. *Renewable Energy* 113: 329–334. doi:10.1016/j.renene.2017.04.071
- Lopez Mejia OD, Mejia OE, Escorcía KM, Suarez F, Laín S (2021). Comparison of Sliding and Overset Mesh Techniques in the Simulation of a Vertical Axis Turbine for Hydrokinetic Applications. In *Processes* (Vol. 9, Issue 11). doi:10.3390/pr9111933
- Lositaño ICM, Danao LAM (2019). Steady wind performance of a 5 kW three-bladed H-rotor Darrieus Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) with cambered tubercle leading edge (TLE) blades. *Energy* 175: 278–291. doi:10.1016/j.energy.2019.03.033
- Manwell JF, McGowan JG, Rogers AL (2009). *WIND ENERGY EXPLAINED Theory, Design and Application Second Edition* (Wiley, Ed.; Second Edi).
- Marin Tellez GJ (2022). *Simulación y optimización del rotor de una turbina eólica de eje vertical de baja capacidad*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Mauro S, Brusca S, Lanzafame R, Messina M (2019). CFD modeling of a ducted Savonius wind turbine for the evaluation of the blockage effects on rotor performance. *Renewable Energy* 141: 28–39. doi:10.1016/j.renene.2019.03.125
- Orlandi A, Collu M, Zanforlin S, Shires A (2015). 3D URANS analysis of a vertical axis wind turbine in skewed flows. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 147: 77–84. doi:10.1016/j.jweia.2015.09.010
- Ostos I, Ruiz I, Gajic M, Gómez W, Bonilla A, Collazos C (2019a). A modified novel blade configuration proposal for a more efficient VAWT using CFD tools. *Energy Conversion and Management*, 180(August 2018), 733–746. doi:10.1016/j.enconman.2018.11.025
- Ostos I, Ruiz I, Gajic M, Gómez W, Bonilla A, Collazos C (2019b). A modified novel blade configuration proposal for a more efficient VAWT using CFD tools. *Energy Conversion and Management*, 180(August 2018), 733–746. doi:10.1016/j.enconman.2018.11.025
- Qin N, Howell R, Durrani N, Hamada K, Smith T (2011). Unsteady flow simulation and dynamic stall behaviour of vertical axis wind turbine blades. *Wind Engineering* 35(4): 511–527. doi:10.1260/0309-524X.35.4.511
- Rezaeiha A, Kalkman I, Blocken B (2017). CFD simulation of a vertical axis wind turbine operating at a moderate tip speed ratio: Guidelines for minimum domain size and azimuthal increment. *Renewable Energy* 107: 373–385. doi:10.1016/j.renene.2017.02.006
- Rezaeiha A, Montazeri H, Blocken B (2018a). Characterization of aerodynamic performance of vertical axis wind turbines: Impact of operational parameters. *Energy Conversion and Management* 169: 45–77. doi:10.1016/j.enconman.2018.05.042
- Rezaeiha A, Montazeri H, Blocken B (2018b). Towards accurate CFD simulations of vertical axis wind turbines at different tip speed ratios and solidities: Guidelines for azimuthal increment, domain size and convergence. *Energy Conversion and Management*, 156(September 2017), 301–316. doi:10.1016/j.enconman.2017.11.026
- Rezaeiha A, Montazeri H, Blocken B (2019). On the accuracy of turbulence models for CFD simulations of vertical axis wind turbines. *Energy* 180: 838–857. doi:10.1016/j.energy.2019.05.053
- Shahizare B, Nazri Bin Nik Ghazali N, Chong WT, Tabatabaeikia SS, Izadyar N (2016). Investigation of the Optimal Omni-Direction-Guide-Vane Design for Vertical Axis Wind



- Turbines Based on Unsteady Flow CFD Simulation. In *Energies* (Vol. 9, Issue 3). doi:10.3390/en9030146
- Tescione G, Ragni D, He C, Simão Ferreira CJ, van Bussel GJW (2014). Near wake flow analysis of a vertical axis wind turbine by stereoscopic particle image velocimetry. *Renewable Energy* 70: 47–61. doi:10.1016/j.renene.2014.02.042
- Tirandaz MR, Rezaeiha A (2021). Effect of airfoil shape on power performance of vertical axis wind turbines in dynamic stall: Symmetric Airfoils. *Renewable Energy* 173: 422–441. doi:10.1016/j.renene.2021.03.142
- Tu J, Heng Yeoh G, Liu C (1995). *Computational Fluid Dynamics A Practical Approach*.
- Untaroiu A, Wood HG, Allaire PE, Ribando RJ (2011). Investigation of Self-Starting Capability of Vertical Axis Wind Turbines Using a Computational Fluid Dynamics Approach. *Journal of Solar Energy Engineering* 133(4). doi:10.1115/1.4004705
- Versteeg HK, Malalasekera W (2007). *An introduction to Computational Fluid Dynamics: the finite volume method*. Second edn. Pearson Education, Harlow, England
- Zhu J, Huang H, Shen H (2015). Self-starting aerodynamics analysis of vertical axis wind turbine. *Advances in Mechanical Engineering* 7(12): 1–12. doi:10.1177/1687814015620968