

DISEÑO DE GENERADORES EÓLICOS DE EJE VERTICAL DE BAJA POTENCIA

DESIGN OF LOW POWER VERTICAL AXIS WIND TURBINES

Julian C. Espeche^a, Facundo Castañón^a, Jose Ramirez^a, Claudio Gatti^a, Sebastián Machado^a y C. M. Saravia^a

^a*Grupo de Multifísica Aplicada, Universidad Tecnológica Nacional Facultad, Regional Bahía Blanca, 11 de Abril 461, 8000, Bahía Blanca, Argentina, gimap@frbb.utn.edu.ar*

Palabras clave: Mécanica de fluidos computacional, Generadores eólicos, Prototipo.

Resumen. En este informe detallamos los avances realizados en el estudio del comportamiento de turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) de pequeña escala. Nos enfocamos en los VAWT de palas híbridas, analizando en particular su capacidad de autoarranque. Realizamos simulaciones numéricas para comprobar la capacidad del modelo de turbulencia Shear Stress Transport (SST) para reproducir la respuesta bidimensional de un generador híbrido con perfiles alares NACA 0012 y NACA 0018, durante la fase de arranque. Usando el programa OpenFOAM, comprobamos que el modelo tiene dificultades para determinar los coeficientes aerodinámicos de los perfiles alares para ángulos de ataque altos. Logramos identificar las áreas de la rotación donde la predicción de los coeficientes deja de ser confiable y evaluamos de manera cualitativa el arranque del generador. Verificamos estos resultados experimentalmente con un generador híbrido que construimos con materiales compuestos. Describimos el proceso de fabricación de dicho generador en detalle. Por último, realizamos simulaciones numéricas unidimensionales para evaluar el uso de perfiles alares no simétricos en las palas de un VAWT. Usamos el software QBlade para realizar las simulaciones, las cuales demostraron que el uso de perfiles no simétricos es posible y podría ser una alternativa viable para el diseño de VAWT.

Keywords: Computational Fluid Mechanics, Wind Turbines, Prototipe.

Abstract. In this document we detailed the progress made in the study of the performance of small scale Vertical Axis Wind Turbines (VAWT). We focused in hybrid VAWT and analyzed their self-starting capabilities. We performed numeric simulations to test how the Shear Stress Transport turbulence model reproduces the bi-dimensional behavior of a hybrid VAWT with symmetric NACA 0012 and 0018 airfoils during the start stage. Using OpenFOAM, we concluded that the model has difficulties predicting the aerodynamic coefficients of the airfoils for high angles of attack. We managed to identify in which areas these errors occurred and performed a qualitative analysis of the start of a VAWT. We checked some of these results with a hybrid VAWT that we constructed with composite materials. We describe the manufacturing process of the wind turbine in detail. Finally, we performed numeric one-dimensional simulations to evaluate the performance of asymmetric airfoils on VAWTs. Using QBlade, the results prove that these profiles could be an alternative in the design of future VAWTs.

1 INTRODUCCIÓN

El consumo de combustibles fósiles para la generación de energía reduce las reservas de recursos no renovables del planeta. Durante el último siglo se ha intentado disminuir esta dependencia mediante la utilización de energías renovables. Nuestro país cuenta con múltiples recursos renovables que pueden ser explotados, siendo la energía eólica el recurso con mayor potencial.

De acuerdo a un estudio realizado por la Cámara Argentina de Energías Renovables (CADER) el potencial teórico de generación eólica en el país es superior a 2000 GW. Sin embargo, debido al tamaño de las turbinas eólicas de eje horizontal y necesidad de grandes zonas de tierra requeridas para su instalación, esta expansión ocurre en zonas rurales, no en zonas urbanas.

Es por esto que el desarrollo de las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) ha ganado interés en los últimos años. Las principales ventajas de los VAWT son que su funcionamiento no depende de la dirección del viento y su construcción puede ser más compacta y sencilla que las turbinas de eje horizontal (Hansen (2007); Hau (2006)). Estas propiedades hacen que las VAWT sean perfectas para llevar a cabo el concepto de autonomía energética, que consiste en instalar pequeñas unidades generadoras de energía que puedan disminuir o cubrir totalmente la demanda energética de un hogar, alumbrado público, entre otros. De esta manera, se reduce la dependencia de la red nacional con aportes de energía renovables.

Los VAWT se clasifican en dos grandes grupos, los generadores tipo Savonius, que funcionan por fuerza de arrastre y son muy poco eficientes, y los generadores Darrieus, que lo hacen por fuerza de sustentación. Estos últimos son más eficientes pero tienen dificultades para arrancar. En los últimos años se ha apuntado a diseños híbridos (Kumar and Wei (2019); Hansen (2007)), que combinen las ventajas de ambos. Sin embargo, el auto arranque sigue siendo la mayor dificultad que ralentiza el avance de los VAWT (Douak et al. (2018); Hau (2006); Whittlesey (2017)).

Con respecto al uso de herramientas computacionales en el diseño de VAWT, en este trabajo realizamos simulaciones bidimensionales (2D) del comportamiento de un generador VAWT. En Franchina et al. (2019) presentan una simulación 2D y tridimensional (3D) de un rotor Darrieus usando el Ansys. Analizando el comportamiento para altas velocidades de rotación, lograron una correcta correlación con resultados experimentales. En A. Untaroiu (2011) presentan un simulación 2D de un rotor con 3 palas usando Ansys y el modelo $\kappa - \epsilon$ de turbulencia. Al comparar las simulaciones con resultados experimentales, concluyen que el modelo predice de manera aceptable las fuerzas aerodinámicas para velocidades operativas, pero las predicciones pierden precisión durante la fase intermedia o de arranque. En Rossetti and Pavesi (2013) modelaron el arranque de generadores VAWT con diferentes métodos numéricos 2D y 3D, usando la Simulación de Escala Adaptativa (SAS) como modelo de turbulencia. Concluyeron que los modelos 3D eran más precisos al predecir el torque generado, pero que aun así se encontraban alejados de valores experimentales.

Buscamos también alternativas para mejorar el desempeño de futuros prototipos. Para esto recurrimos a perfiles asimétricos y simulaciones unidimensionales (1D), basadas en la teoría de Momento de Elemento de Pala (Blade Element Moment o BEM). En Peukert et al. (2016) demostraron la utilidad de métodos unidimensionales para el cálculo de cargas en aerogeneradores. En Brahimi and Paraschivoiu (2021) verificaron la precisión de las predicciones del método unidimensional BEM con resultados experimentales y con otros modelos más complejos. Concluyeron que la diferencia del método BEM con datos experimentales es comparable a métodos bidimensionales que requieren muchos más recursos computacionales.

En este trabajo, en primera instancia, realizamos una simulación numérica 2D para analizar la fase arranque de un generador VAWT. Luego, recurrimos a simulaciones 1D que nos permiten evaluar alternativas de diseño con mayor facilidad.

2 SIMULACIÓN 2D

La simulación bidimensional del VAWT fue realizada siguiendo el trabajo realizado en [Ramírez and Saravia \(2021\)](#), donde presentan una simulación numérica 2D para comprobar los cálculos de los coeficientes aerodinámicos realizados por el modelo SST $\kappa - \omega$ sobre perfiles NACA 0012 y 0018. También analizan cualitativamente las cargas del rotor durante la fase de arranque.

A continuación, presentamos el análisis realizado sobre las predicciones de los coeficientes aerodinámicos con el modelo de turbulencia SST $\kappa - \omega$ para distintos ángulos de ataque. Además, se analiza cómo impactan estas predicciones en el comportamiento del generador VAWT para distintas velocidades de rotación.

2.1 Metodología

Realizamos la simulación del arranque de un generador VAWT con Computational Fluid Dynamics (CFD). Entre los métodos disponibles para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, elegimos Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) que es uno de los más utilizados debido a su bajo coste computacional ([Yu and Thè \(2016\)](#)). Como modelo de turbulencia, elegimos el modelo SST $\kappa - \omega$ debido a que presenta baja sensibilidad a las condiciones de entrada y a las ventajas que ofrece en situaciones de gradientes de presión adversos y de separación de capa límite ([Menter \(1994\)](#); [Menter et al. \(2003\)](#)). Estos modelos fueron implementados en el software OpenFOAM, uno de los más usados para realizar simulaciones CFD.

A partir de parámetros que observamos en productos comerciales, definimos los parámetros geométricos del generador a simular. El número de palas usualmente era igual a 3, por lo que usamos ese valor. Uno de los perfiles aerodinámicos más comúnmente empleados, el *NACA 0012* fue el que seleccionamos. Para el rotor fijamos las dimensiones con los siguientes valores: radio (R) 0.4 m , altura de las palas 1 m , y longitud de cuerda del perfil 0.1 m .

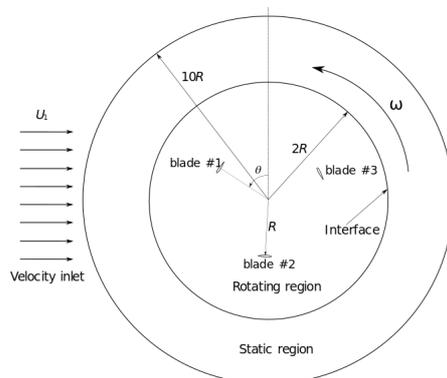


Figure 1: Esquema representativo del dominio analizado

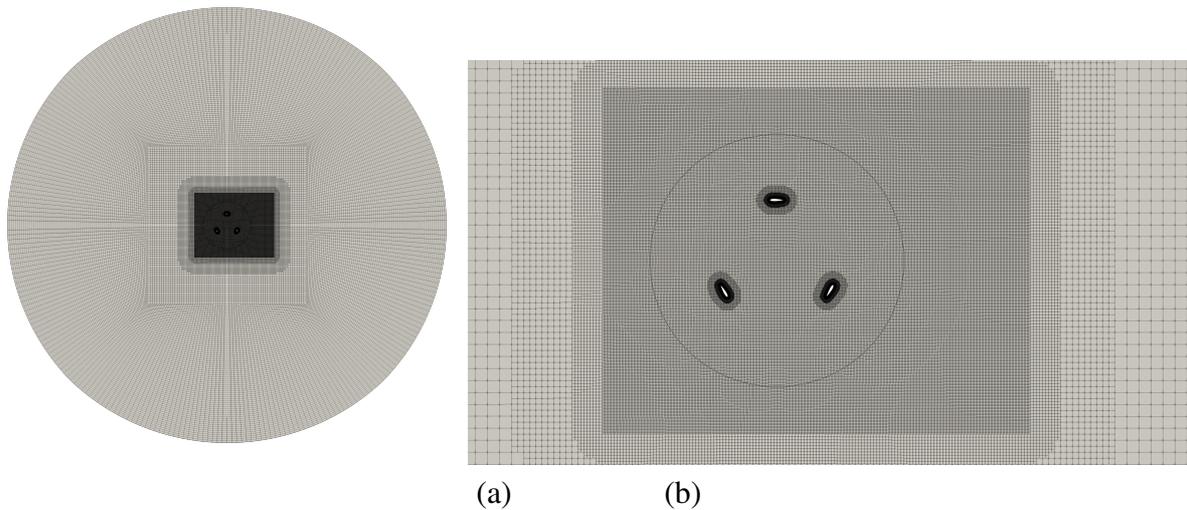


Figure 2: (a) Dominio mallado completo. (b) Detalle de la malla estática y dinámica

El dominio computacional que simulamos fue definido como dos regiones circulares, una región interna que contiene al generador simulado y con la capacidad de rotar, y la otra región es externa y fija, simulando el flujo libre. El espesor de las celdas cercanas a los perfiles lo definimos de tal manera que el factor adimensional y^+ sea igual a 1. El espesor total de la capa límite se fijó en $0.02c$, siendo c la longitud de cuerda del perfil. Se dividieron esta sección en 20 subcapas, con un factor de expansión de 1.2, de acuerdo con lo indicado en [G. Bangga and Hansen \(2020\)](#). Estimamos que el número de celdas supera 1.2 millones.

Sobre este flujo externo aplicamos la condición de que la derivada de la presión sea nula sobre la pared externa de la malla estática. El solver que implementamos es `pimpleFOAM`, que utiliza el método PISO-SIMPLE para acoplar las ecuaciones de presión y de velocidad y el método aplicado para avanzar el tiempo de la simulación es el Crank-Nicolson de segundo orden. Para que las celdas entre ambas regiones se igualen, recurrimos al algoritmo de mapeo de parches AMI.

Comparamos los coeficientes aerodinámicos de arrastre (C_d) y de sustentación (C_l) calculados por el modelo elegido con coeficientes obtenidos experimentalmente ([Anyoji et al. \(2014\)](#); [Sheldahl and Klimas \(1981\)](#)). El ángulo de ataque queda determinado por la velocidad del viento y la velocidad de la pala, la dirección de esta última varía a medida que el perfil rota.

La velocidad del flujo externo la fijamos en 10 m/s tanto a la entrada como a la salida, que es una velocidad típica para representar ambientes urbanos. Esto fue verificado con mediciones diarias durante un año en una ubicación típica por nuestra estación meteorológica. Por lo tanto, para representar la variación en la velocidad de rotación de la turbina, usamos la relación de velocidades de punta (Tip Speed Ratio), un parámetro adimensional que se define como:

$$TSR(\lambda) = \frac{\omega R}{U_\infty}$$

Donde ω es la velocidad angular de la pala, R el radio de del generador y U_∞ la velocidad del flujo libre.

2.2 Resultados

En esta sección presentamos los resultados de los cálculos realizados. En la Fig. 3, presentamos los coeficientes aerodinámicos calculados por el modelo en función del ángulo de ataque

sobre el perfil de las palas del generador simulado.

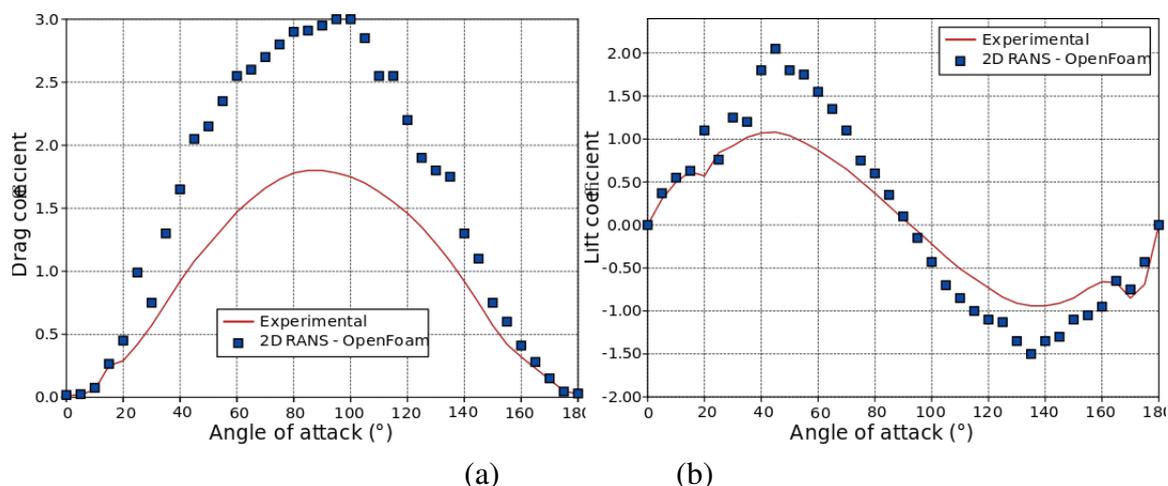


Figure 3: Coeficiente de (a) arrastre y (b) sustentación para el perfil NACA 0012 en función del ángulo de ataque

Observamos que el modelo predice con precisión ambos coeficientes para ángulos de ataque menores a 15° . Sin embargo, observamos diferencias importantes en la predicción de los coeficientes para ángulos de ataque mayores. Para verificar cómo afecta este error en la predicción de los coeficientes, verificamos cuál es la fracción de una rotación durante la cual la pala y el viento forman un ángulo de ataque mayor a 15° para distintos TSR.

En la Fig.4 se presenta el coeficiente de arrastre en función del ángulo de rotación para TSR igual a 0.40, 1.05, 2.10 y 2.70.

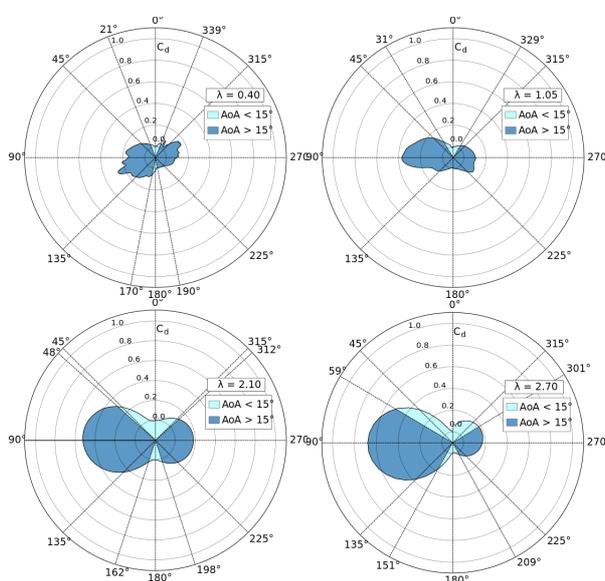


Figure 4: Coeficiente de arrastre como función del ángulo de rotación para distintos TSR

Para un TSR pequeño como 0.4, observamos que durante más del 80% de la rotación el ángulo de ataque sobre el perfil es mayor a 15° . Esto demuestra que los coeficientes aerodinámicos son mal calculados por el modelo durante una parte importante del arranque. Incluso a velocidades de rotación en la región estacionaria, como TSR de 2.1, la predicción de los coeficientes es aceptable solamente en el 36% de la rotación completa.

3 SIMULACIÓN 1D

En esta sección presentamos los resultados de las simulaciones 1D realizadas luego de comprobar los errores en las predicciones de las simulaciones 2D. Basadas en la teoría BEM, las simulaciones 1D demandan menos recursos computacionales. Esto no implica que las predicciones realizadas serán incorrectas, ya que se tienen en cuenta complejos efectos de flujo tridimensional con parámetros de corrección.

En primera instancia, comparamos los resultados obtenidos por este método con los obtenidos por las simulaciones 2D. Al mismo tiempo, ensayamos con perfiles aerodinámicos asimétricos en las palas del rotor, debido a que la simplicidad del método permite analizar opciones de diseño más fácilmente. A partir de estos resultados, planeamos futuros prototipos a construir.

3.1 Metodología

Para implementar los perfiles aerodinámicos, usamos el software QBlade. Éste está pensado para resolver simulaciones 1D de VAWTs basadas en la teoría de BEM (Husaru et al. (2019); Peukert et al. (2016)). Para calcular los coeficientes de arrastre (C_d) y de sustentación (C_l), utilizamos XFOIL un software incorporado en QBlade. Debido a la formulación de la capa límite desarrollada en este software, descrita en Drela and GILES (1987); Drela (1989), es posible obtener los coeficientes aerodinámicos de un perfil en función del ángulo de ataque sobre él mismo. Los resultados obtenidos por el software son válidos en un rango limitado de ángulos. No obstante, es posible extrapolar los coeficientes calculados por XFOIL para completar la referencia de coeficientes para los 360° de ángulos de ataque posibles.

Para que se pueda implementar los generadores en el software, necesitamos detallar su geometría, sus dimensiones y el perfil aerodinámico que poseen. Seleccionamos dimensiones similares al generador simulado en 2D, por lo que el radio del rotor es 0.50 m , la altura de las palas es de 0.75 m y la longitud de cuerda del perfil es 0.20 m . Establecimos la velocidad de viento en 10 m/s , que es la velocidad de viento promedio que obtuvimos tras medir un año con nuestra estación meteorológica. Las propiedades del flujo las especificamos con los siguientes valores: la densidad igual a 1.225 Kg/m^3 y viscosidad igual a $1.647 * 10^{-5}\text{ Kg/m * s}$. Cada pala de los generadores la dividimos en 100 elementos y especificamos 150 iteraciones máximas para los cálculos y un factor de relajación $\zeta = 0.35$.

El uso de perfiles aerodinámicos no simétricos puede ofrecer alternativas al diseño de generadores eólicos de eje vertical (Alsabri and Mohamed (2019); Mohamed (2012)). La principal diferencia entre un perfil simétrico y otro asimétrico es que la relación entre el coeficiente de Sustentación (C_l) y el coeficiente de Arrastre (C_d) es menor para los perfiles asimétrico. Debido a su geometría, los perfiles asimétricos generan una mayor fuerza de arrastre lo cual podría ayudar con el auto-arranque del generador, como ocurre con los generadores Savonius. Además, la fuerza de sustentación en estos perfiles puede ser similar o mayor a la de los perfiles simétricos, por lo que su rendimiento para altas velocidades de rotación es similar o mejor.

Los perfiles aerodinámicos que seleccionamos para las simulaciones fueron el AH93W215, el AH93W257 y el NACA 63(4) – 421, de acuerdo a lo observado en bibliografía (Kumar and Wei (2019); Mohamed (2012); Alsabri and Mohamed (2019)). Para tener como comparación un perfil simétrico, simulamos también el perfil NACA 0018, que es uno de los perfiles simétricos más empleados en generadores de eje vertical. Todos los perfiles pueden ser observados en la Fig. 5.

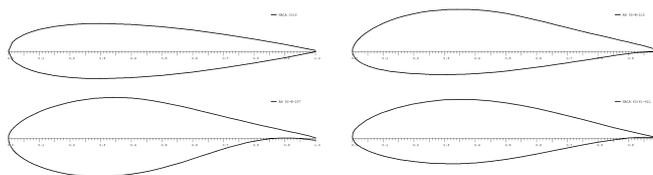


Figure 5: Perfiles aerodinámicos estudiados

Para analizar los resultados obtenidos, comparamos dos coeficientes adimensionales; el coeficiente de potencia (C_p), que es la relación entre la potencia generada y la potencia total disponible en el volumen de aire ocupado por el generador, y el coeficiente de momento (C_m), que es la relación entre el torque generado por las fuerzas aerodinámicas y el producto de la presión dinámica que actúa sobre el perfil y el área sobre la que actúa.

3.2 Resultados

A continuación, presentamos los resultados de las simulaciones realizadas. Se pueden observar los coeficientes de momento y de potencia para un rango de TSR, para cada uno de los distintos perfiles seleccionados.

Analizando los gráficos en la Fig. 6 notamos que para el perfil *NACA 0018* existe una zona a bajos TSR donde ambos coeficientes aerodinámicos (el C_m y el C_p) son negativos. Ésto es debido a que para un rango de bajas velocidades de rotación, la capa límite se desprende de la superficie del perfil, y la fuerza de sustentación generada es muy baja.

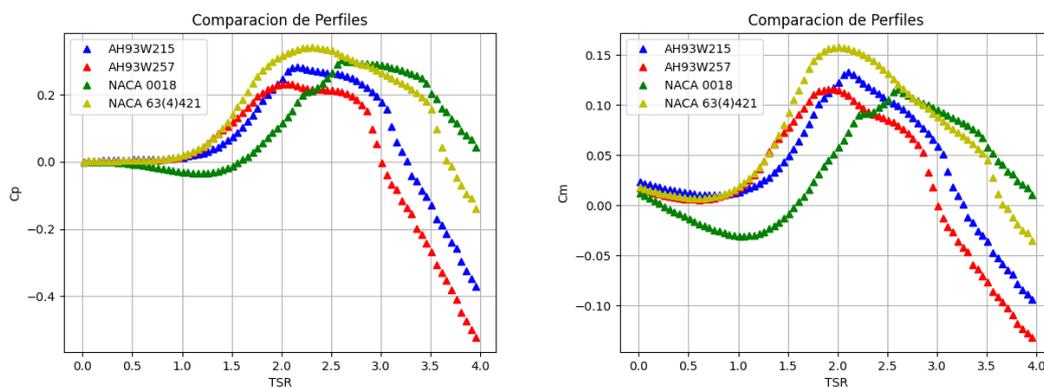


Figure 6: Coeficientes de potencia y momento para los generadores analizados

Asimismo, el perfil genera poco arrastre, por lo que el torque generado promediado a lo largo de una rotación resulta ser opuesto al sentido de rotación de las palas. Consecuentemente, el C_m es negativo, lo que hace que la potencia generada, y por lo tanto el C_p , sean ambos menor a cero. Esto podría explicar los problemas en el auto-arranque de los generadores VAWT que utilizan perfiles simétricos. También, demuestra que a pesar de la simplicidad del modelo seleccionado, podemos representar efectos prácticos observables experimentalmente.

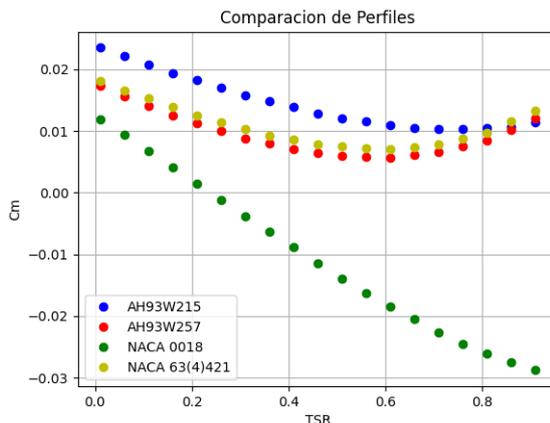


Figure 7: Coeficiente de momento a bajas revoluciones de rotación

La Fig. 7 muestra con más detalles los valores del coeficiente de momento para bajas velocidades de rotación. Para los perfiles asimétricos *AH93W257* y *NACA 63(4)421*, observamos que los C_m son muy similares entre sí, aunque ligeramente inferiores al perfil *AH93W215*. Para mayores revoluciones, cercanas al pico de rendimiento, vemos que el perfil *NACA 63(4)421* presenta el mejor desempeño entre los perfiles estudiados.

A partir de estos resultados, decidimos construir un prototipo de una sola pieza con una impresora 3D. Debido a las limitaciones espaciales del volumen de impresión disponible en la impresora que utilizaremos, las dimensiones del prototipo deben modificarse. El diámetro de este prototipo será de 0.18 m y la altura para las palas será de 0.15 m . Debido a que esta relación de aspecto es distinta a la del prototipo construido, no es posible escalar la longitud de la cuerda del perfil.

Por lo tanto, estudiamos el rendimiento del generador con las dimensiones del prototipo monopieza y el perfil *AH93W215*, para distintas longitudes de cuerda. Las longitudes seleccionadas son 0.025 , 0.035 y 0.05 m . Estas longitudes fueron obtenidas tratando de mantener la solidez mínima del rotor, para así reducir la masa y la inercia inicial del mismo.

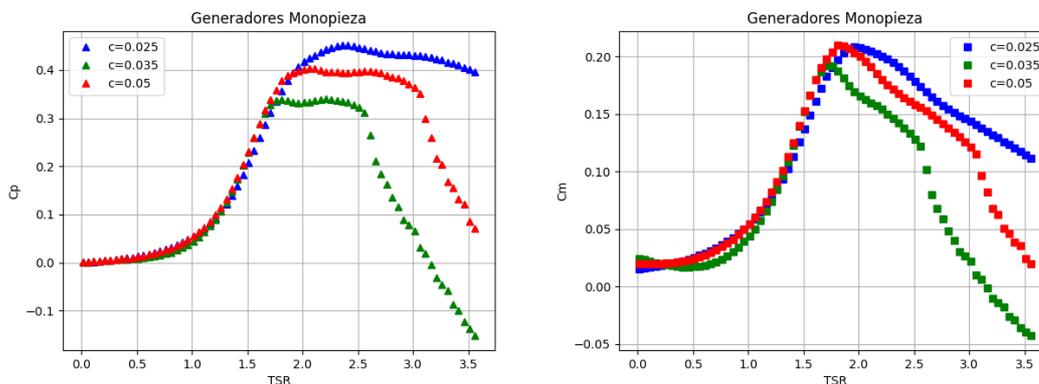


Figure 8: Comportamiento estimado de generadores monopieza

Como observamos en la Fig. 8, el torque inicial generado es muy similar en todos los casos. En cambio, al concentrarse en el desempeño a revoluciones mayores, la menor longitud de

cuerda de 0.025 m , presenta el mejor rendimiento entre las variantes estudiadas. Por lo tanto, seleccionamos esta longitud de cuerda para el prototipo que será impreso.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo presentamos un análisis de una formulación 2D para representar VAWTs usando el modelo de turbulencia SST $\kappa - \epsilon$ y simulaciones 1D de varios generadores con distintos perfiles aerodinámicos.

Si bien la utilidad del modelo de turbulencia SST $\kappa - \epsilon$ 2D para simular el comportamiento de VAWTs para altos TSR es aceptable, comprobamos que los errores en la predicción de los coeficientes aerodinámicos a bajos TSR afectan negativamente los resultados obtenidos. Para el perfil analizado los errores son mayores en la fase de arranque del rotor, por lo que no resulta ser una herramienta útil para el diseño de futuros generadores.

Recurrimos a una herramienta 1D basada en la teoría de Cantidad de Momento de la Pala. Definiendo 100 elementos para cada pala y un factor de relajación $\zeta = 0.35$, logramos comparar el comportamiento del mismo generador con distintos perfiles aerodinámicos. También, pudimos estudiar y definir dimensiones de un futuro prototipo más pequeño y obtener datos del rendimiento del mismo, que serán verificados experimentalmente.

REFERENCES

- A. Untaroiu H. G. Wood P.E.A.R.J.R. Investigation of self-starting capability of vertical axis wind turbines using a computational fluid dynamics approach. *Journal of Solar Energy Engineering*, (4), 2011. doi:10.1115/1.4004705.
- Alsabri A. and Mohamed M. *Comparison Investigation of Airfoils Used in H-Rotor Darrieus Wind Turbine*. Ph.D. thesis, 2019. doi:10.13140/RG.2.2.36595.89128.
- Anyoji M., Okamoto M., Hidaka H., Kondo K., Oyama A., Nagai H., and Fujii K. Control surface effectiveness of low Reynolds number flight vehicles. *Journal of Fluid Science and Technology* 9, (5), 2014. doi:10.1299/jfst.2014jfst0072.
- Brahimi T. and Paraschivoiu I. Aerodynamic analysis and performance prediction of vawt and hawt using cardaav and qblade computer codes. *IntechOpen*, 2021. doi:10.5772/intechopen.96343.
- Douak M., Aouachria Z., Rabehi R., and Allam N. Wind energy systems: Analysis of the self-starting physics of vertical axis wind turbine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81:1602–1610, 2018. ISSN 1364-0321. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.238.
- Drela M. Xfoil: An analysis and design system for low reynolds number airfoils. volume 54. 1989. ISBN 978-3-540-51884-6. doi:10.1007/978-3-642-84010-4_1.
- Drela M. and GILES M. Viscous-inviscid analysis of transonic and low reynolds number airfoils. *Aiaa Journal - AIAA J*, 25:1347–1355, 1987. doi:10.2514/3.9789.
- Franchina N., Persico G., and Savini M. 2d-3d computations of a vertical axis wind turbine flow field: Modeling issues and physical interpretations. *Renewable Energy*, 136:1170–1189, 2019. ISSN 0960-1481. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.086.
- G. Bangga A. Dessoky Z.W.K.R. and Hansen M.O. Accuracy and consistency of cfd and engineering models for simulating vertical axis wind turbine loads. *Energy*, 206, 2020.
- Hansen M. *Aerodynamics of Wind Turbines*. Earthscan, 2007. ISBN 978-1-844072-438-9 (hbk).
- Hau E. *Wind Turbines*. Springer, 2006. ISBN 978-3-540-24240-6.
- Husaru D.E., Bârsănescu P.D., and Zahariea D. Effect of yaw angle on the global performances

- of horizontal axis wind turbine - QBlade simulation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 595:012047, 2019. doi:10.1088/1757-899x/595/1/012047.
- Kumar P. M. S.K.N.S.L.T.C.R.S. and Wei H. A review on the evolution of the darrieus vertical axis wind turbine:small wind turbines. *Journal of Power and Energy Engineering* 7, pages 27–44, 2019. doi:10.4236/jpee.2019.74002.
- Menter F., Kuntz M., and Langtry R. Ten years of industrial experience with the sst turbulence model. *Heat and Mass Transfer* 4, (8), 2003.
- Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal* 32, (8):1598–1605, 1994. doi:10.2514/3.12149.
- Mohamed M. Performance investigation of h-rotor darrieus turbine with new airfoil shapes. *Energy*, 47(1):522–530, 2012. ISSN 0360-5442. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.08.044. Asia-Pacific Forum on Renewable Energy 2011.
- Peukert J., Marten D., Pechlivanoglou G., Nayeri C., and Paschereit C. An unsteady aerodynamics model for lifting line free vortex wake simulations of hawt and vawt in qblade. 2016. doi:10.1115/GT2016-57184.
- Ramírez J. and Saravia C. Assessment of reynolds-averaged navier-stokes method for modeling the start-up regime of a darrieus rotor. *Physics of Fluids*, 33, 2021. doi:10.1063/5.0045083.
- Rossetti A. and Pavesi G. Comparison of different numerical approaches to the study of the h-darrieus turbines start-up. *Renewable Energy* 50, page 7–19, 2013. doi:10.1016/j.renene.2012.06.025.
- Sheldahl R.E. and Klimas P.C. Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines. 1981. doi:10.2172/6548367.
- Whittlesey R. *Vertical Axis Wind Turbines: Farm and Turbine Design*. Academic Press, 2017.
- Yu H. and Thè J. Validation and optimization of SST k-e turbulence model for pollutant dispersion within a building array. *Atmospheric Environment* 145, pages 225–238, 2016. doi:10.1016/j.atmosenv.2016.09.043.