

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE GENERADORES EÓLICOS HÍBRIDOS DE PEQUEÑA ESCALA CON IMPRESIÓN 3D

DESIGN AND FABRICATION OF SMALL SCALE HYBRID WIND TURBINE WITH 3D PRINTING

Julián C. Espeche^a, Facundo Castañón^a, Martín Saravia^a y Sebastián P. Machado^a

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

Palabras clave: Energía eólica, VAWT, Mecánica de Fluidos Computacional, Impresión 3D.

Resumen. Los generadores de eje vertical son una prometedora opción para la generación de energía local en zonas urbanas. En este artículo, estudiamos la viabilidad de fabricar un generador Savonius-Darrieus con una impresora 3D. Recurrimos a la teoría unidimensional de cantidad de momento de elemento de pala y al software QBlade para realizar simulaciones computacionales del desempeño de múltiples perfiles asimétricos en turbinas eólicas de pequeña escala. Caracterizamos su capacidad de generación. Estudiamos también las técnicas de impresión 3D posibles para producir prototipos de los generadores simulados, evaluando particularmente su terminación superficial. Concluimos que, entre los perfiles estudiados, encontramos varias opciones viables, ya que poseen un buen torque inicial y una amplia zona operativa para generación de energía. Logramos imprimir generadores híbridos de pequeña escala usando ácido poliláctico y acrílico butadieno estireno, logrando mejores resultados al dividir al rotor en partes.

Keywords: Wind Energy, VAWT, Computational Fluid Dynamics, 3D printing.

Abstract. Small scale vertical-axis wind turbines are a promising candidate for powering urban electronics. In this document, we study the factibility of 3D printing a small scale Darrieus-Savonius wind turbine. We have used CFD and the one-dimensional Blade Element Moment theory and the QBlade software to perform computer simulations and address the performance of several asymmetrical profiles in a small scale VAWT. We characterized the power output and their dynamic response. We also studied the suitability of 3D printing techniques for manufacturing the simulated generators, judging their dimensional tolerance, printing speed, surface quality and their structural stability. We concluded that fabricating small scale hybrid turbines with commonly used materials as polylactic acid and acrylonitrile butadiene styrene is feasible, provided the rotor in divided in parts. From the studied profiles, we found several viable design options that have a good starting torque and wide operating window for energy generation.

1. INTRODUCCIÓN

Debido al sostenido aumento de la población mundial, la demanda energética es cada vez mayor. Sumado a esto, el consumo continuo de las reservas de combustibles fósiles requiere que se encuentren fuentes renovables de energía. Dentro de este grupo la energía eólica ha surgido como una alternativa importante. De hecho, la energía eólica ha estado expandiéndose rápidamente a nivel mundial en los últimos años [Nwaigwe \(2022\)](#); [Joselin Herbert et al. \(2007\)](#).

Este fenómeno también viene ocurriendo en el país, con la continua construcción de parques eólicos, que se han concentrado principalmente en la Patagonia [Carlos et al. \(2018\)](#); [Giralt \(2011\)](#). En estos parques eólicos se utilizan turbinas eólicas de eje horizontal, las cuales pueden ser grandes y eficientes. Sin embargo, estos parques son cada vez más grandes, debido al tamaño de la turbinas eólicas necesarias y a que se necesitan grandes cantidades de terreno debido a las fuertes perturbaciones que se crean en la estela de estos generadores.

Con el objetivo de automatizar sensores o sistemas de iluminación en zonas urbanas o remotas, buscamos diseñar generadores de eje vertical (Vertical Axis Wind Turbine o VAWT) de pequeña escala, los cuales han sido estudiados ampliamente en los últimos años. [Kumar et al. \(2019\)](#); [Loganathan et al. \(2017\)](#); [Victor y Paraschivoiu \(2018\)](#); [Mauro et al. \(2019\)](#); [Ji y Schluter \(2011\)](#)

1.1. Estado del arte

Para simular computacionalmente la respuesta dinámica del generador recurrimos a un modelo 2D basado en la teoría de momento de elemento de pala (Blade Element Momentum o BEM) implementada en el software QBlade (<https://qblade.org/>). Si bien, el modelo de turbulencia RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) sigue siendo el más utilizado, presenta dificultades para predecir correctamente las fuerzas aerodinámicas involucradas.

[Sanvito et al. \(2021\)](#) realizaron simulaciones computacionales con un modelo BEM 3D de un VAWT tipo Darreius y de otro Troposkien, ambos de pequeña escala. Los resultados de las simulaciones fueron comparados con datos experimentales, con diferencias inferiores al 10 % en la potencia y torque generado, al igual que las fuerzas estructurales involucradas.

[Rocchio et al. \(2018\)](#) desarrollaron un modelo 3D para el software de cálculo ANSYS (<https://www.esss.co/es/ansys-simulacion-computacional/>) basado en la teoría BEM para simular un rotor SANDIA y una turbina Troposkien. Los resultados fueron comparados cualitativamente con datos experimentales. En ambos casos, las respuestas dinámicas aproximaron bien las respuestas obtenidas de bibliografía, especialmente en la predicción del torque y del coeficiente de potencia.

Por otro lado, la impresión 3D con plásticos ha surgido en el último tiempo como una alternativa accesible y rápida de implementar para la manufactura de partes y prototipos. Los plásticos que pueden ser utilizados poseen variedad de propiedades mecánicas, las cuales pueden variar mucho de acuerdo a los parámetros de la impresión. Sin embargo, una debilidad de este método es la terminación superficial, lo que dificulta la aplicación deseada.

[Martín et al. \(2021\)](#) evaluaron las propiedades mecánicas de piezas impresas en Fused Deposition Modelling (FDM), con los plásticos ABS y PLA. Las piezas tenían diferentes disposiciones de relleno. Las deposiciones estudiadas fueron concéntricas, triangulares y vacías. Las partes impresas con rellenos concéntricos mostraron una resistencia ligeramente más alta que las demás.

[Jayanth et al. \(2018\)](#) estudiaron el efecto de tratamiento químico en la superficie de piezas impresas mediante FDM en ABS. Las partes fueron sumergidas en acetona y 1,2 dicloroetano.

La suavidad de la superficie fue evaluada cualitativamente mientras que el módulo elástico fue medido. Las piezas tratadas con 1,2 dicloroetano mostraron una mejor terminación superficial. Sin embargo, las piezas tratadas con acetona presentaban un módulo elástico al menos 25 % mayor que las piezas tratadas con el otro solvente. Todas las piezas tratadas presentaban menores módulos elásticos que las piezas sin tratar, con un reducción cercana al 30 %.

Más estudios sobre impresión 3D pueden verse en [Wickramasinghe et al. \(2020\)](#); [Garg et al. \(2016, 2017\)](#)

2. PROCEDIMIENTO

A continuación detallamos la metodología utilizada durante el trabajo.

2.1. Geometría del rotor

En primer lugar definimos la geometría del generador VAWT a diseñar. Comparando las distintas opciones, decidimos construir un rotor híbrido en forma de H. Las palas tienen la forma de un perfil aerodinámico, que genera principalmente fuerza de sustentación y funciona de manera similar a un generador Darreius. Mientras que los soportes, que se unen a la parte central, tienen una forma semicircular, pensados para generar arrastre como un rotor Savonius, especialmente a bajas velocidad de rotación.

De esta manera buscamos aprovechar las ventajas de ambos diseños. El bajo torque inicial y la dificultades de auto-arranque de las palas Darreius se benefician con el torque de arrastre generado por los soportes. Mientras que la baja eficiencia de generación a altas velocidades del rotor Savonius no debería afectar sustancialmente a las palas del generador. Debido a que priorizamos la generación a altas revoluciones, la relación de área entre las palas Savonius y las Darreius quedo establecida en 1:4. Un esquema del prototipo impreso puede observarse en la Fig. 1

Con la geometría definida, continuamos con la selección del perfil aerodinámico a usarse en las palas del generador. Para ello, recurrimos a simulaciones computacionales del comportamiento dinámico del generador.

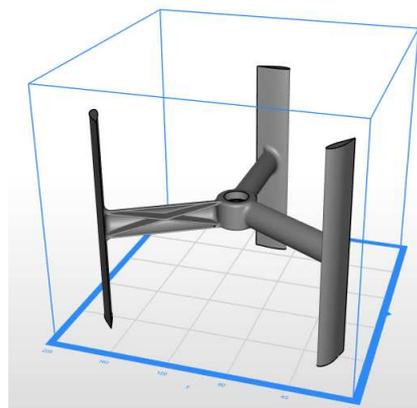


Figura 1: Esquema tridimensional del generador VAWT

2.2. Simulaciones con modelado BEM

Utilizando el software QBlade, simulamos computacionalmente las palas del generador para evaluar el rendimiento de distintos perfiles aerodinámicos. El modelo utiliza dos discos actua-

dores, uno de ellos se encuentra en la cara frontal del generador, mientras que el otro disco se ubica en la parte trasera del mismo. Durante la simulación se calcula el torque y la potencia generada sobre el área de cada pala que interseca cada disco. Las palas se encuentran seccionadas en 5 partes, con 50 elementos cada una. Las limitaciones del modelado 2D, como los complejos efectos de flujo tridimensionales, se representan con coeficientes empíricos,

De la gran cantidad de perfiles disponibles, el primero que probamos fue el perfil simétrico *NACA0018*, el cual es usado en VAWTs comerciales. Pero debido a las dificultades encontradas durante la fase de arranque del mismo, recurrimos a perfiles asimétricos. Estos perfiles pueden generar fuerzas de sustentación similares en orden a las de perfiles simétricos pero generando también fuerzas de arrastre, las cuales pueden ayudar a aumentar el torque durante la fase de arranque. Los perfiles asimétricos que evaluamos fueron el *AH93W215*, el *NACA 23012*, el *NACA 24112* y el *NACA 254112*.

En todos las simulaciones, adaptamos las dimensiones del generador al volumen de impresión de la impresora. Fijamos el radio del rotor en $0,1\text{ m}$, la altura de las palas en $0,2\text{ m}$ y la longitud de cuerda del perfil en $0,05\text{ m}$.

Para comparar el desempeño de los perfiles, usamos coeficientes adimensionales de momento (C_m) y de potencia (C_p). El primero es una medida adimensional del torque generado por el rotor, mientras que el coeficiente de potencia indica la eficiencia del generador. Ambos coeficientes son expresados en función de la relación de velocidades de punta (Tip Speed Ratio o TSR), que es la relación entre la velocidad de rotación de una pala y la velocidad del viento.

2.3. Impresión de prototipo

Con todos los parámetros definidos, procedemos a la construcción del mismo. Para esto, utilizamos una impresora 3D Zortrax M200Plus. Para el diseño tuvimos en cuenta que el generador se uniría a futuro con un eje, por lo que había que dejar lugar en el centro para los rodamientos.

En primera instancia dibujamos el generador para que sea impreso en una sola pieza, para evitar trabajos posteriores. Sin embargo, notamos que de esta manera era muy susceptible a los posibles cambios o fallas que se pueden presentar durante una impresión, como capas desplazadas, mala adhesión de las primeras capas o expansión de capas intermedias. Por lo que procedimos a dividir el generador en partes que se ensamblarían más tarde.

Para imprimir las piezas utilizamos el plástico ABS, debido a que sus propiedades mecánicas se adaptan mejor a la aplicación deseada. Para el relleno de la piezas elegimos hexágonos concéntricos, que minizan el material necesario. Determinamos que el ancho de las capas de plástico en 0.014 m ya que comprobamos empíricamente que la terminación superficial de la piezas era buena sin aumentar considerablemente el tiempo de impresión. La temperatura del extrusor la fijamos en $245\text{ }^\circ\text{C}$ para asegurar que se funda el plástico, debido a algunos inconvenientes observados durante las primeras impresiones. La temperatura de la cama se fijó en $80\text{ }^\circ\text{C}$ para asegurar la adhesión de la pieza.

El generador se separó en tres palas, que tendrían la forma de alguno de los perfiles aerodinámicos estudiados, tres soportes con forma convexa en la dirección de cuerda del perfil y una masa central que uniría los soportes y contendría a los rodamientos. Implementamos muescas para facilitar el ensamblaje, durante el cual también usamos silicona para asegurar una buena adhesión entre las piezas.

Realizamos también un tratamiento químico de algunas piezas impresas con acetona con el objetivo de mejorar la terminación superficial de las mismas. Rodeamos las piezas con paños humedecidos con acetona en un recipiente pequeño cerrado. Debido a que no encontramos un procedimiento estandarizado para garantizar el efecto deseado, procedimos a dejar un par de

piezas sumergidas por un período de 2 horas y otro grupo de piezas durante 50 minutos. Luego evaluamos cualitativamente la terminación de todas las piezas.

3. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones y de las impresiones realizadas.

3.1. Simulaciones BEM 2D

Inicialmente comparamos el perfil *NACA* 0018 con el perfil *AH93W215*, para comprobar la diferencia entre perfiles simétricos y asimétricos. En la Fig. 2 se muestra el torque generado en función de las velocidades de rotación. Observamos una mejora en el torque de arranque para el perfil asimétrico, así como un pico de torque a revoluciones intermedias. Mientras que para el perfil simétrico notamos una zona de torque negativo a bajas revoluciones, lo que podría ser indicativo de las dificultades de auto-arranque que poseen estos perfiles. El pico de torque es menor y también se da a revoluciones mayores que el perfil asimétrico.

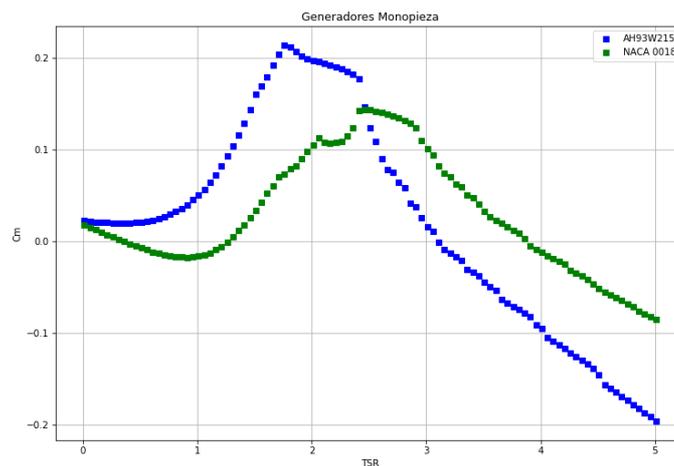


Figura 2: Coeficiente de momento para el perfil simétrico (NACA 0018) y otro asimétrico (AH93W215)

Continuamos luego a comparar todos los perfiles asimétricos. Cuando comparamos los torques generados, que se encuentran en la Fig. 3, todos los perfiles parecen tener comportamientos similares. Los valores de torque iniciales son similares y los picos de torque se dan en rangos cercanos de relación de velocidades.

Pero evaluando los coeficientes de potencia, mostrados en la Fig. 4, observamos algunas diferencias. Notamos que los perfiles *NACA* son capaces de generar más potencia y en un rango mayor de TSR que el perfil *AH93W215*. Entre los tres perfiles *NACA*, el perfil *NACA* 23012 observamos que es menos eficiente que los demás. Entre los otros dos perfiles casi no hay diferencias en las curvas de torque o de potencia. Por lo que seleccionamos el perfil *NACA* 24112 para imprimir el prototipo.

3.2. Tratamiento químico

En la Fig. 5 mostramos una de las piezas sin tratar y el resto de las piezas que tratamos con acetona. Observamos que las piezas con orientación vertical recibieron el tratamiento en toda

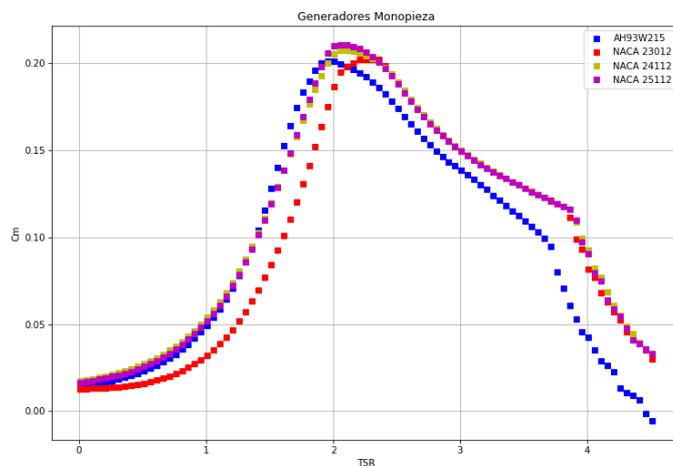


Figura 3: Coeficiente de momento de los perfiles asimétricos para distintos TSR

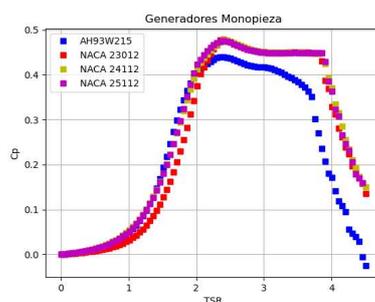


Figura 4: Coeficiente de potencia de los perfiles simétricos para distintos TSR

su superficie, mientras que las piezas que expusimos durante 2 horas sufrieron deformaciones importantes. La pieza que recibió el tratamiento horizontalmente durante 50 minutos solo se suavizó del lado inferior.

La pieza que mejor tomó el tratamiento fue la que colocamos verticalmente durante 50 minutos en el recipiente. Cuando la analizamos con detalle, vimos que la superficie quedó con una terminación brillante y suave, aunque un poco viscosa. Aunque, luego de un tiempo de secado, sentimos la pieza menos pegadiza al tacto.

3.3. Impresión 3D

A continuación se muestran las impresiones realizadas. En la Fig 6 mostramos las piezas separadas luego de la impresión, y el generador ya ensamblado, con las partes lijadas pero sin ser tratadas con acetona.

4. CONCLUSIÓN

En este trabajo evaluamos la posibilidad de utilizar métodos numéricos y técnicas de impresión 3D para el diseño y fabricación de un generador eólico VAWT de pequeña escala. Logramos modelar las palas del generador con un modelo BEM, evaluando el desempeño de distintos perfiles. Estos resultados nos permitieron seleccionar un perfil para un construir un generador eficiente. Pudimos realizar un tratamiento químico de las piezas para mejorar la terminación



Figura 5: Piezas tratadas con acetona

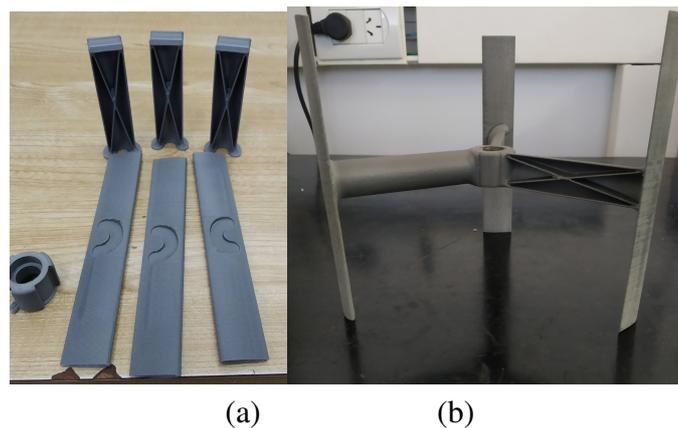


Figura 6: (a)Partes del generador por separado. (b) generador armado con rodamientos incorporados

superficial. Y finalmente, construimos un primer prototipo del generador.

En trabajos futuros probaremos el generador en un túnel de viento para verificar que las simulaciones realizadas son correctas.

REFERENCIAS

- Carlos A., Vladimiro V., y Francisco G. Innovación y marcos regulatorios en energías renovables: el caso de la energía eólica en la argentina. 2018. doi:10.13140/RG.2.2.34011.11041.
- Garg A., Bhattacharya A., y Batish A. On surface finish and dimensional accuracy of FDM parts after cold vapor treatment. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(4):522–529, 2016. doi:10.1080/10426914.2015.1070425.
- Garg A., Bhattacharya A., y Batish A. Chemical vapor treatment of abs parts built by FDM: Analysis of surface finish and mechanical strength. *Int J Adv Manuf Technol*, 89:2175–2191, 2017. doi:10.1007/s00170-016-9257-1.
- Giralt C. Energía eólica en argentina : un análisis económico del derecho (dossier). *Letras Verdes, Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 2011. doi:10.17141/

- letrasverdes.9.2011.904.
- Jayanth N., Senthil P., y Prakash C. Effect of chemical treatment on tensile strength and surface roughness of 3d-printed abs using the fdm process. *Virtual and Physical Prototyping*, 13(3):155–163, 2018. doi:10.1080/17452759.2018.1449565.
- Ji X. y Schluter J. Design and analysis of small-scale vertical axis wind turbine. *IET Conference Publications*, 2011:1–10, 2011. doi:10.1049/cp.2011.0214.
- Joselin Herbert G., Iniyan S., Sreevalsan E., y Rajapandian S. A review of wind energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(6):1117–1145, 2007. ISSN 1364-0321. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.08.004.
- Kumar P., Sivalingam K., Narasimalu S., Lim T.C., Ramakrishna, S., y Wei H. Review on the evolution of Darrieus vertical axis wind turbine: Small wind turbines. *Journal of Power and Energy Engineering*, 7:27–44, 2019. doi:10.4236/jpee.2019.74002.
- Loganathan B., Mustary I., Chowdhury H., y Alam F. Effect of turbulence on a savonius type micro wind turbine. *Energy Procedia*, 110:549–554, 2017. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.183.
- Martín M.J., Auñón J.A., y Martín F. Influence of infill pattern on mechanical behaviour of polymeric and composites specimen manufactured using fused filament fabrication technology. *Polymers*, 13(17), 2021. doi:https://dx.doi.org/10.3390/polym13172934.
- Mauro S., Brusca S., Lanzafame R., y Messina M. Micro h-darrieus wind turbines: Cfd modeling and experimental validation. *AIP Conference Proceedings*, 2191(1):020109, 2019. doi:10.1063/1.5138842.
- Nwaigwe K. Assessment of wind energy technology adoption, application and utilization: a critical review. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, (19):4525–4536, 2022. doi:https://doi.org/10.1007/s13762-021-03402-2.
- Rocchio B., Deluca S., Salvetti M., y Zanforlin S. Development of a bem-cfd tool for vertical axis wind turbines based on the actuator disk model. *Energy Procedia*, 148:1010–1017, 2018. ISSN 1876-6102. doi:https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.060. ATI 2018 - 73rd Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association.
- Sanvito A.G., Dossena V., y Persico G. Formulation, validation, and application of a novel 3d bem tool for vertical axis wind turbines of general shape and size. *Applied Sciences*, 11(13), 2021. ISSN 2076-3417. doi:10.3390/app11135874.
- Victor S. y Paraschivoiu M. Performance of a darrieus turbine on the roof of a building. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 42(4):341–349, 2018. doi:10.1139/tcsme-2017-0096.
- Wickramasinghe S., Do T., y Tran P. Fdm-based 3d printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments. *Polymers*, 12(7), 2020. ISSN 2073-4360. doi:10.3390/polym12071529.