

Estudio del ángulo de ataque de los álabes de un aerogenerador construido con scrap de tubos de Polietileno.

Lucio G.A, Ponzoni L.M.E., Ganiele M.J., Tripodi R., Montenegro S.O., Daverio N., Moreno M., Arcone D.A., Pereira M.C.

RESUMEN

Uno de los aspectos más importantes del diseño de un aerogenerador que emplea perfiles alares es analizar el ángulo óptimo de ataque y su relación con los coeficientes de sustentación y arrastre (C_l - Lift y C_d - Drag), de modo de optimizar el rendimiento del perfil empleado en el aerogenerador para una velocidad del viento dada. En este trabajo se estudia esta relación en un aerogenerador de baja potencia instalado en el Campus de la Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF), con el fin de optimizar su rendimiento. Los álabes fueron construidos a partir de retazos de tubos de polietileno de alta densidad, por lo que el perfil aerodinámico no se encuentra normado. Debido a la naturaleza del material con que se construyeron, el perfil obtenido no es constante a lo largo de los mismos. Por este motivo, se analizaron 5 secciones del perfil mediante el software Javafoil, tomados en forma equidistante a lo largo del álabe y se obtuvo la variación de la relación entre los coeficientes de sustentación y arrastre respecto al ángulo de ataque para cada uno de los mismos, analizado para la velocidad del viento de la zona. Se encontró que con un ángulo de ataque de 11° es posible encontrar la mayor fuerza de sustentación con el menor arrastre, de modo tal que la fuerza resultante obtenida será aquella que permita generar la mayor potencia. En forma complementaria, este método permite evaluar perfiles alares no estandarizados, como el utilizado para el aerogenerador instalado en la UNTREF.

ABSTRACT

One of the most important aspects of the design of a wind turbine that uses wing profiles is to analyze the optimal angle of attack and its relationship with the Lift and Drag Coefficients (C_l and C_d), in order to optimize the performance of the profile used in the wind turbine for a given wind speed. In this work, this relationship is studied in a low power wind turbine installed in the Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF) Campus, in order to optimize its performance. These blades were built from scraps of high density polyethylene tubes, so the aerodynamic profile is not regulated, and due to the nature of the material with which they were built, the profile obtained is not constant along them. For this reason, 5 sections of the profile were analyzed using the Javafoil software, taken equidistantly along the blade obtaining the variation of the relation between C_l and C_d with the angle of attack, analyzed for the wind speed of the

area. With an angle of attack of 11° it is possible to find the highest lift force with the least drag, so that the resulting force obtained will be the one that allows generating the higher power. In a complementary way, this method allows evaluating non-standardized wing profiles, such as the one used for the wind turbine installed in the UNTREF.

PALABRAS CLAVE

Perfil Alar, Ángulo de Ataque, Aerogenerador, Energía, Renovable.

KEY WORDS

Airfoil, Angle of Attack, Wind Turbine, Energy, Renewable.

COLOBORADORES

Dra. María Petraglia, Ing. Julio Sola, Universidad Nacional de Tres de Febrero, Comisión Nacional de Energía Atómica, Fundación Weiba.

CONTEXTO

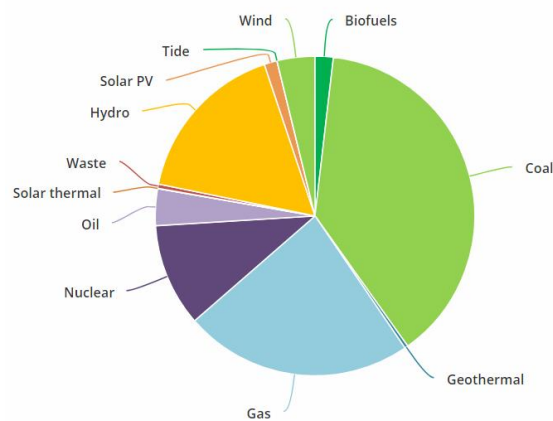
En este trabajo se estudió el ángulo de ataque de los álabes de un aerogenerador de baja potencia instalado en la Sede Villa Lynch de la Universidad Nacional de Tres de Febrero, contribuyendo así al Proyecto “Aerogenerador Social”. El mismo se encuentra acreditado por la Universidad Nacional de Tres de Febrero bajo la dirección del Dr. Lucio Ponzoni, y su desarrollo se hizo en conjunto entre ésta y la Comisión Nacional de Energía Atómica.

El proyecto tiene como objetivo construir un aerogenerador de baja potencia con materiales reutilizados, destinado a comunidades de bajos recursos donde el suministro de energía eléctrica representa un problema importante a resolver.

INTRODUCCIÓN

Actualmente la matriz energética mundial se compone mayoritariamente de energía eléctrica generada a través de la quema de combustibles fósiles (1) (Figura 1). Estos combustibles son fuentes no renovables de energía y su consumo genera altas emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Reemplazando este tipo de generación por energías renovables, como la energía eólica, se evita no sólo consumir recursos no renovables sino también la generación de los mismos.

Figura 1: Participación en la generación de energía eléctrica por combustible mundial en 2016.



Fuente: International Energy Agency (1).

A su vez, Argentina se encuentra transitando una crisis energética, ya que la matriz instalada no logra satisfacer la demanda de consumo (2). Esto se debe a que el crecimiento industrial y la demanda en hogares no fueron acompañados con un aumento de generación o inversión en la distribución de energía eléctrica, que se vio reflejado con una mayor frecuencia y duración de cortes de luz, principalmente en la Ciudad de Buenos Aires y sus alrededores (Figura 2).

Figura 2: Evolución de la Balanza Comercial Energética 2007-2016.



Fuente: Informe estadístico Anual 2016. Ministerio de Energía y Minería de la República Argentina (2).

En este contexto, la Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF), se encuentra desarrollando el Proyecto “Aerogenerador Social” (Figura 3), siendo este un prototipo de generador eólico de eje horizontal de baja potencia construido con materiales reciclables y reutilizados, instalándose el primer prototipo a finales del 2018 en el campus de la UNTREF (3).

Figura 3: Aerogenerador instalado en la sede Villa Lynch de la Universidad Nacional de Tres de Febrero.



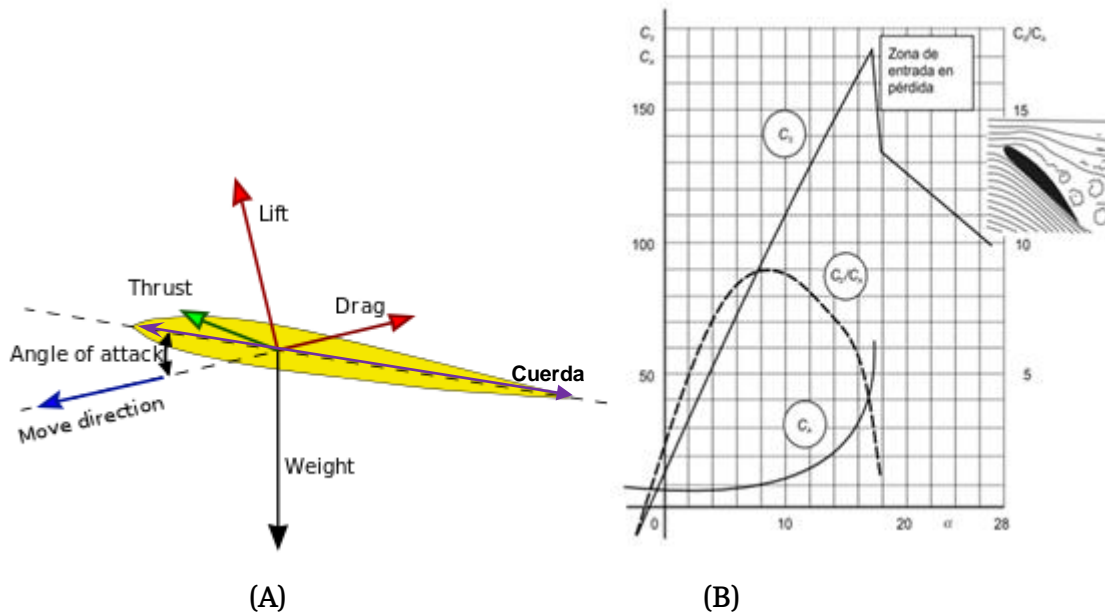
Fuente: Elaboración propia.

El objetivo de este aerogenerador es generar energía eléctrica para instalarlo en comunidades de bajos recursos, priorizando que los materiales para su construcción sean reutilizados o de industria nacional.

Uno de los elementos esenciales del aerogenerador es el perfil alar (álabe), ya que este permite generar la fuerza necesaria para el mismo rote con la velocidad del viento. Por tanto, la energía entregada por el aerogenerador, dependerá principalmente del álabe del mismo (4)(5).

Entre las variables más importante de un álabe se encuentra el ángulo de ataque (denominado con la letra α), que es el ángulo que forma el plano central del álabe con la dirección del viento. La teoría alar muestra que existe una relación entre este ángulo y las fuerzas que aparecen en el álabe (fuerza de sustentación "Lift", perpendicular a la dirección del viento y fuerza de arrastre "Drag", paralela a la misma) como se muestra en la Figura 4 A y B (6).

Figura 4: (A) Fuerzas actuantes sobre un perfil aerodinámico. (B) Variación de los C_l y C_d en función del ángulo de ataque.



Fuente: Centrales de Energías Renovables: Generación Eléctrica con Energías Renovables (6).

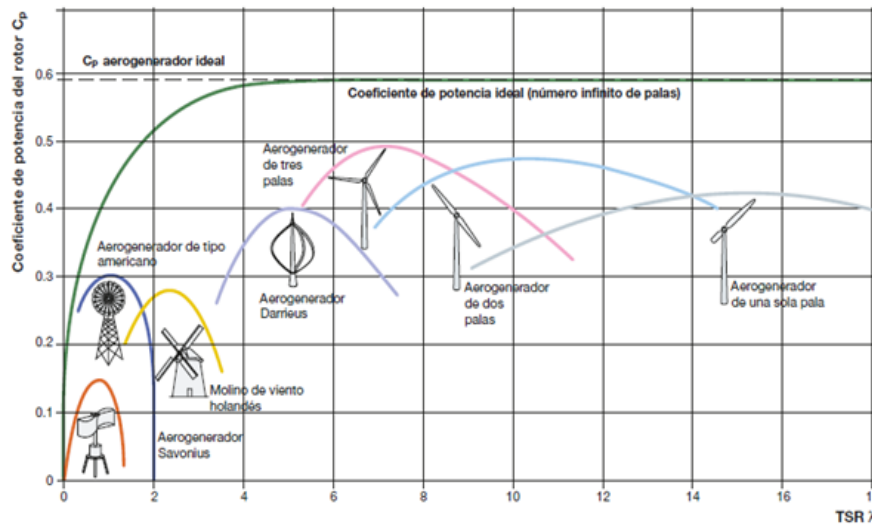
Las características aerodinámicas de un álabe generalmente se definen mediante la relación TSR-Coeficiente de Presión. La velocidad específica (TSR, Tip Speed Ratio) se define como la relación entre la velocidad tangencial en el extremo del álabe y la velocidad del viento a la entrada del flujo sin perturbar (4):

$$TSR = \frac{R \times \omega}{v}$$

- ω =velocidad angular
- R =radio de giro
- v =velocidad del viento

La TSR es un término que sustituye al número de revoluciones por minuto del rotor; sirve para comparar el funcionamiento de máquinas eólicas diferentes e indica que la periferia de la pala circula a una velocidad TSR veces mayor que la velocidad del viento v (Figura 5).

Figura 5: Relación entre el Coeficiente de Potencia y la TSR.



Fuente: Cuaderno de aplicaciones técnicas N°12 – Plantas Eólicas (4).

Para maximizar la eficiencia de un perfil alar se busca obtener el ángulo de ataque óptimo de manera de maximizar las fuerzas de sustentación, que genera la rotación, y minimizar la fuerza de arrastre, que actúa reduciendo la velocidad del viento (7).

Para ello, se analizó la variación de las fuerzas que actúan sobre el modelo de álabes empleado en el aerogenerador de la UNTREF (Figura 6) -los cuales, al ser realizados a partir de materiales reutilizados, no se encuentran normados- en función de los ángulos de ataque mediante Javafoil, un programa de software libre que modeliza el comportamiento del flujo alrededor de los perfiles aerodinámicos.

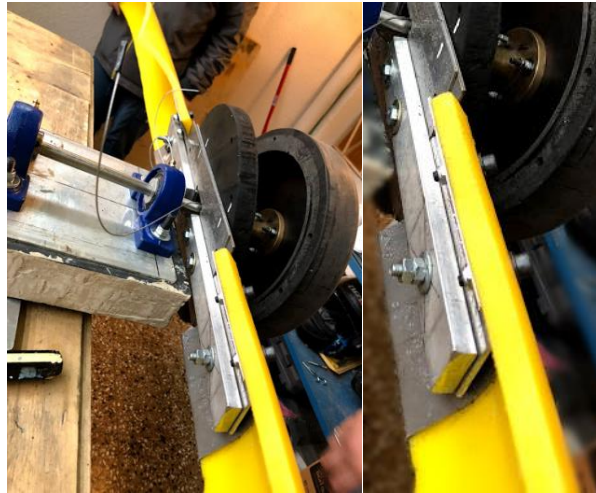
En la Figura 7 se puede observar el sistema de sujeción empleado en los álabes al eje de rotación. La distancia del extremo de agarre del álabes al mismo es de 62,5mm.

Figura 6: Vista lateral y frontal del modelo de perfil de álabes del aerogenerador social empleado.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7: Unión de los álabes con el eje de rotación.



Fuente: Elaboración propia.

OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo consiste en determinar el ángulo de ataque que tenga la mayor relación entre coeficientes de sustentación y arrastre y, consecuentemente, genere la mayor potencia, para los álabes del prototipo de aerogenerador instalado en la sede Villa Lynch de la Universidad Nacional de Tres de Febrero.

Por otro lado, los objetivos específicos son:

- Representar en 3D el perfil instalado y generar las distintas secciones.
- Modelizar la relación entre coeficientes de sustentación y arrastre y ángulo de ataque para cada uno de los perfiles.
- Identificar aquel ángulo que genere la mayor sustentación, minimizando la fuerza de arrastre.
- Calcular la potencia generada.

METODOLOGÍA

En este trabajo se modeló el álabe empleado en la construcción del prototipo de aerogenerador instalado en el campus de la UNTreF primero mediante un programa CAD y luego mediante un software diseño de perfiles alares.

Para la construcción del álabe del aerogenerador se usó un tubo de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) de dimensiones de 180 mm de diámetro externo, 10 mm de espesor y 1400 mm de longitud, como el mostrado en la Figura 8.

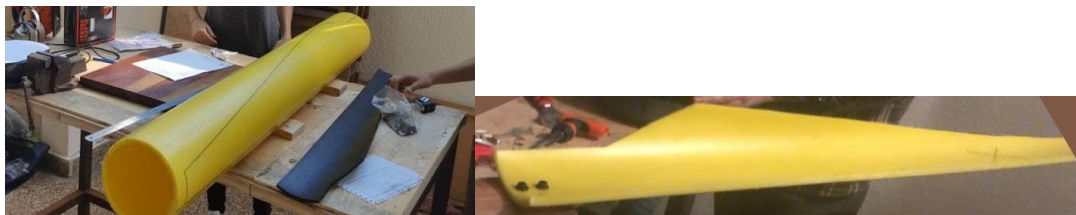
Figura 8: Tubo utilizado de PEAD 100-As Received.



Fuente: Elaboración propia.

Luego, se proyectó sobre el tubo el diseño de la geometría de perfil alar a construir y se lo cortó empleando una sierra, quedando el álabe finalizado (Figura 9 A y B).

Figura 9: (A) Geometría proyectada en el tubo PEAD. (B) Alabe construido.



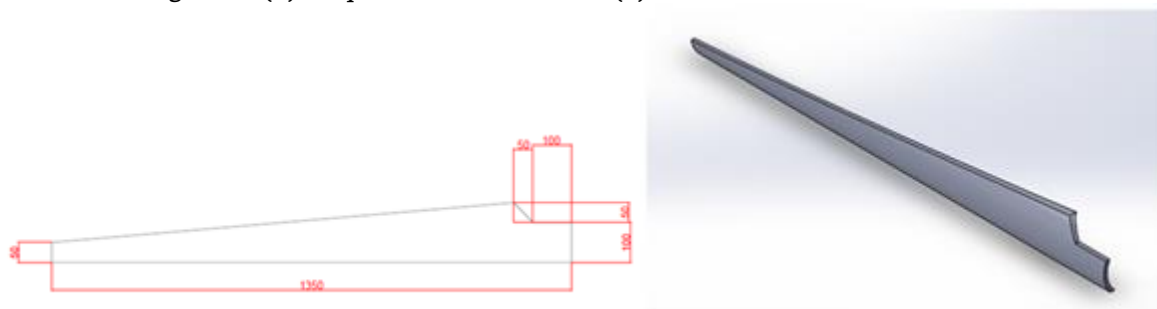
(A)

(B)

Fuente: Elaboración propia.

Para realizar el modelado del perfil aerodinámico, se realizó su modelado en 3D mediante la herramienta SolidWorks® (Figura 10 A y B).

Figura 10: (A) Croquis del alabe instalado. (B) Vista isométrica en SolisWorks®



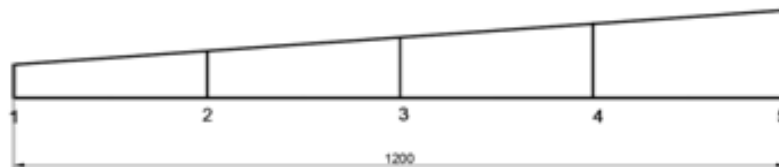
(A)

(B)

Fuente: Elaboración propia.





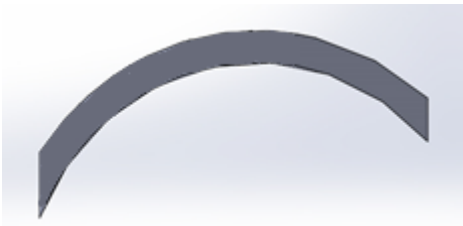
Dibujado el álabe en 3D se realizaron cortes transversales cada 300 mm, obteniendo de este modo 5 secciones del perfil alar. Se tomaron diferentes secciones transversales para analizar el álabe despreciando el agarre (Figura 11), ya que debido a las características de su diseño cada sección del álabe tiene distinto largo y curvatura, lo que genera distintas características en contacto con el flujo del viento y distintos coeficientes C_l/C_d (C_l -Lift y C_d -Drag). Cada una de las secciones del álabe analizada se muestra en la Tabla 1.

Figura 11: Cortes realizados a lo largo del área en planta del perfil aerodinámico.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1: Secciones del álabe tomadas cada 300mm.

 <p>Sección 1</p>	 <p>Sección 2</p>
 <p>Sección 3</p>	 <p>Sección 4</p>
 <p>Sección 5</p>	

Fuente: Elaboración propia.

Las características de cada sección del perfil alar se muestran en la Tabla 2. Para estimar el número de Reynolds se tomó la velocidad media del viento en la zona a una altura de

10 m, que de acuerdo a los datos presentados en el trabajo de tesis de grado (8) y de la NASA (9) es de 4 m/s en la zona estudiada.

Tabla 2: Características de las diferentes secciones analizadas del perfil alar.

Sección del Perfil	Distancia al extremo del álabe [m]	Cuerda [m]	Re
1	1,35	0,051	13500
2	1,05	0,074	19588
3	0,75	0,095	25174
4	0,45	0,115	30441
5	0,15	0,134	35471

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para analizar cada una de las secciones del álabe se empleó el programa Javafoil (10), que es un software libre capaz de resolver el campo de velocidades y presiones alrededor de perfiles aerodinámicos inmersos en un flujo determinado. Para la modelización de cada sección del perfil alar se usó la cuerda y el número de Reynolds (11).

A partir de la simulación se obtuvieron los coeficientes de sustentación y arrastre para cada una de las secciones obtenidas en función del ángulo de ataque (12) (13). Estos se pueden visualizar en la Figura 12.

Figura 12: Variación Cl/Cd en función del ángulo de ataque en las secciones de perfiles seleccionados.



Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que para ángulos menores a 1° los perfiles 2 y 3 poseen una relación entre los coeficientes negativa, que resultaría en una fuerza en sentido inverso, mientras el perfil 1 entra en pérdida a partir de 0°. Se eligió como ángulo óptimo $\alpha=11^\circ$, que coincide con la relación más alta para los perfiles 2, 3, 4 y 5 (Tabla 3).

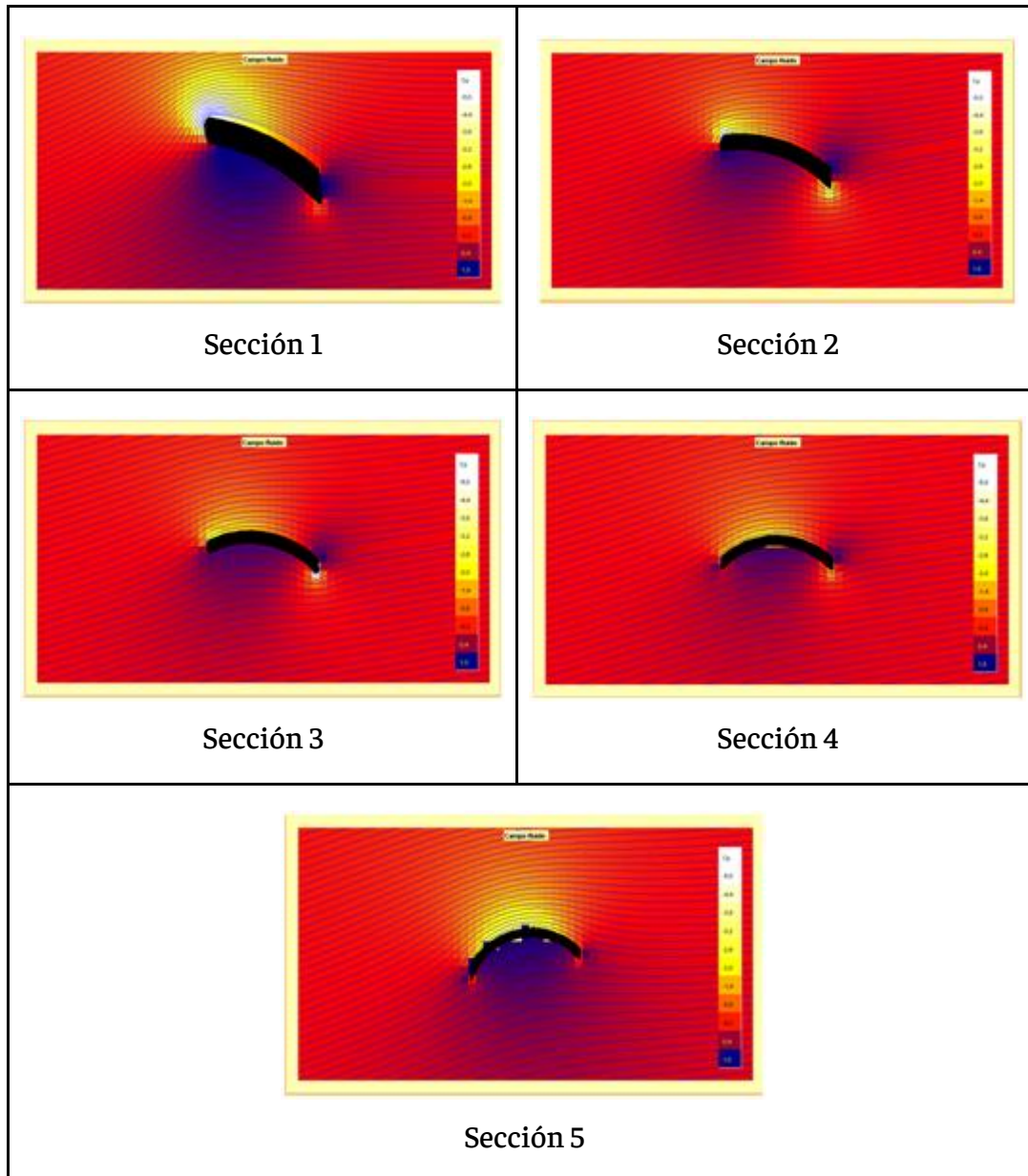
Tabla 3: Coeficientes obtenidos con $\alpha=11^\circ$.

Sección del Perfil	Cl	Cd	Cl/Cd
1	1,010	0,973	1,0376
2	1,021	0,163	6,2823
3	1,155	0,100	11,5824
4	1,193	0,074	16,1785
5	3,028	0,082	36,7297

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4 se representa el campo de presiones de cada perfil para el ángulo de ataque hallado óptimo (11°) y las líneas de corriente alrededor de cada sección del perfil.

Tabla 4: Campo de presiones analizado en las 5 secciones del perfil alar con un ángulo de ataque de 11° .



Fuente: Elaboración propia.

La zona más oscura indica zonas de altas presiones (cara expuesta al viento - intradós), mientras que los colores naranja y amarillo representan zonas de presiones bajas (cara posterior - extradós), es decir donde se produce el efecto de succión. Esto se debe a que, de acuerdo con el principio de Bernoulli, la corriente tiene que rodear el borde de ataque cuando impacta con el perfil experimentando una notable aceleración, que se corresponde con una disminución de la presión (14).

Obtenido el ángulo óptimo de ataque, se buscó calcular las fuerzas de sustentación y arrastre de todo el álabe. Teniendo en cuenta que cada sección del álabe analizado tiene distintas fuerzas de sustentación y arrastre para un mismo ángulo, y que la fuerza depende además de los coeficientes C_l y C_d del área en planta donde se ejerce, se planteó calcular una fuerza resultante como la composición de fuerzas actuantes en las diferentes secciones del álabe.

Para el cálculo de las fuerzas de arrastre y sustentación en cada una de las secciones se decidió tomar el coeficiente medio de la sección analizada, y luego se obtuvo la fuerza resultante en cada una de estas secciones componiendo las fuerzas de sustentación (F_l) y arrastre (F_d) calculadas con las expresiones matemáticas de abajo (Tabla 5)(14)(15). La velocidad empleada para el cálculo fue la velocidad media de la zona (4 m/s) y la densidad del aire a temperatura ambiente (20°C).

$$F_l = \frac{1}{2} (C_l \rho A v^2) ; F_d = \frac{1}{2} (C_d \rho A v^2)$$

- F_l : Fuerza de Sustentación
- F_d : Fuerza de Arrastre
- C_l : Coeficiente de Sustentación (Tabla N°3)
- C_d : Coeficiente de Arrastre (Tabla N°3)
- ρ = Densidad= 1,204 Kg/m³
- A = Área en planta, donde se ejerce la fuerza (tabla N°4)
- v = Velocidad del viento = 4m/s

Tabla 5: Fuerzas de sustentación y arrastre obtenidas.

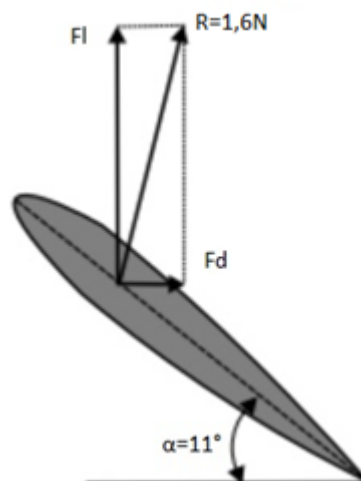
Sección Alar	Cl medio	Cd medio	Área [m ²]	Fl [N]	Fd [N]	Resultante [N]
1-2	1,016	0,568	0,019	0,183	0,103	0,210
2-3	1,088	0,131	0,025	0,266	0,032	0,268
3-4	1,174	0,087	0,032	0,356	0,026	0,357
4-5	2,111	0,078	0,037	0,759	0,028	0,760

Fuente: Elaboración propia.

Componiendo todas las fuerzas de las 4 secciones del álabes, obtenemos como Fuerza Resultante para un viento medio de 4m/s un valor de 1,6 N (Figura 13), dando un resultado de 3,2 N para el caso de aerogeneradores bipala, como el instalado en la UNTREF.

Si bien esta fuerza parece despreciable a prima facie, su valor puede ser comprendido a partir de la baja velocidad de diseño empleada, ya que para el caso de que la velocidad se incremente a 13 m/s, una velocidad típica de diseño en la curva característica de aerogeneradores (16), la fuerza se incrementaría a 33,69 N, fuerza más que suficiente para generar un par necesario para mover un generador de imanes permanente para generar electricidad.

Figura 13: Fuerza resultante sobre el perfil alar para un ángulo de 11°.



Fuente: Centrales de Energías Renovables: Generación Eléctrica con Energías Renovables (6).

Una vez obtenida la fuerza resultante, se puede calcular la potencia obtenida considerando que:

$$P = M \times \omega$$

$$M = F \times d$$

- P= Potencia
- M= Momento
- F= Fuerza resultante
- ω =velocidad angular
- d= distancia del centro de masa al eje de giro

Mediante la herramienta SolidWorks® es posible encontrar la ubicación del centro de masa y medir la distancia del mismo al extremo de agarre del álabe (Figura 14). La distancia que se toma para calcular el momento será entonces la suma entre esta distancia y aquella del extremo del álabe al eje de rotación mostrada en la Figura 7.

Figura 14: Centro de masa del álabe.



Fuente: Elaboración propia.

El momento de la fuerza resultante con respecto al eje de rotación es:

$$M = F \times d$$

$$M = 1,6N \times (0,58m + 0,0625m) = 1,028Nm$$

La velocidad angular se puede estimar a partir de la TSR. Para aerogeneradores bipala se encuentra en un rango entre 8-14, por lo que se tomó un valor medio de TSR=11. El radio de giro se toma como la distancia de la punta del álabe al eje de rotación.

$$TSR = \frac{R \times \omega}{v}$$

$$\omega = TSR \times v \div R = 11 \times \frac{4 \text{ m}}{\text{s}} \div (1,35\text{m} + 0,0625\text{m}) = 31,15 \text{ rad/s}$$

Entonces, la potencia mecánica es:

$$P = M \times \omega$$

$$P = 1,028 \text{ Nm} \times 31,15 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 32\text{W}$$

$$32\text{W} \times 2 \text{ álabes} = 64\text{W}$$

En cambio, si se considera una velocidad de diseño $v=13\text{m/s}$

$$P = F \times d \times \omega$$

$$\omega = TSR \times v \div R = 11 \times \frac{13 \text{ m}}{\text{s}} \div (1,35\text{m} + 0,0625\text{m}) = 101,24 \text{ rad/s}$$

$$P = 33,69\text{N} \times (0,58\text{m} + 0,0625\text{m}) \times 101,24 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 2191\text{W}$$

$$2191\text{W} \times 2 \text{ álabes} = 4382\text{W} = 4,4\text{kW}$$

A partir de este análisis, se puede evidenciar la relevancia que tiene la variable velocidad de viento en la extracción de potencia de un aerogenerador, ya que un incremento de velocidad de 4 m/s a 13 m/s, implicó un salto sustancial de la potencia generada, de 64 W a 4400 W respectivamente. En consecuencia, es importante su instalación en zona donde la velocidad de viento se lo mas alta posible para maximizar la potencia extraída mediante esta tecnología.

CONCLUSIONES

En este trabajo se optimizó el ángulo de ataque de un perfil alar empleado en un aerogenerador a partir del uso de herramientas de programas de simulación, mostrando que es una herramienta útil para ser usada en el diseño de perfiles alares. Al tratarse de un álabe de forma irregular, se analizó el álabe en secciones independientes, encontrándose que para un ángulo de ataque de $\alpha=11^\circ$ respecto del viento, la relación entre la fuerza de sustentación y arrastre resultante se maximizan, generando la máxima potencia del aerogenerador. La fuerza resultante sobre el álabe se obtuvo como resultado

de analizar la fuerza en diferentes secciones equidistantes y componiéndolas para obtener la fuerza sobre todo el álabe. Se observó que esta fuerza depende en gran medida de la velocidad del viento, variando esta con el cuadrado de la misma. Para la velocidad de diseño empleado en este trabajo de 4m/s la fuerza resultante fue de 2,8N, para una velocidad de 13 m/s (velocidad promedio de diseño de aerogeneradores de baja potencia) la fuerza se incrementó a 33,69N. Esta dependencia de la velocidad del viento se evidencia más aún, al analizar la potencia mecánica generada por el aerogenerador bipala instalado en la UNTreF, donde la potencia se podría incrementar de 64 W a 4400W, es decir en dos órdenes de magnitud.

Los resultados encontrados en este trabajo permitirán mejorar el diseño de aerogenerador construido e instalado en campus de la Universidad Nacional de Tres de Febrero-Argentina. Asimismo, este método permite evaluar perfiles alares irregulares y no estandarizados, para el análisis de álabes de aerogeneradores construidos a partir de tubos materiales reutilizados, que de otra manera constituirían residuos.

Es necesario destacar que el ángulo de ataque fue determinado de forma teórica, por lo que debe ser complementado con ensayos empíricos, como un ensayo en un túnel de viento que permitiría corroborar o ajustar estos valores teóricos encontrados en el presente trabajo.

BILBIOGRAFIA

- [1] International Energy Agency: <https://www.iea.org/statistics/> [Consulta en línea: 22/11/18]
- [2] Informe estadístico Anual 2016. Ministerio de Energía y Minería de la República Argentina
- [3] Proyecto de Investigación Código 31/17 521A. Universidad Nacional de Tres de Febrero. Director: Dr. Lucio Ponzoni.
- [4] Asea Brown Boveri S.A. (2012). Cuaderno de aplicaciones técnicas N°12 – Plantas Eólicas. Barcelona
- [5] Instituto Tecnológico de Canarias (2008). Energías Renovables y Eficiencia Energética. Canarias.
- [6] Carta González, José Antonio; Calero Pérez, Roque; Colmenar Santos, Antonio; Castro Gil, Manuel-Alonso (2009). Centrales de Energías Renovables: Generación Eléctrica con Energías Renovables. Madrid.
- [7] Fernández Díez, Pedro (2000). Energía Eólica. Cantabria.

- [8] Ganiele, Ma. Julieta. (2018). Análisis estadístico de datos para la creación de un mapa de vientos en la zona de Villa Lynch/ San Martín. Tesis de grado de Ing. Ambiental. Universidad Nacional de Tres de Febrero.
- [9] <https://eosweb.larc.nasa.gov/acronymsabbreviations/sse> [Consulta en línea: 22/11/18]
- [10] <https://www.mh-aerotoools.de/airfoils/javafoil.htm> [Consulta en línea: 22/11/18]
- [11] Rolón, H., Villamizar, Y. y Acevedo, C. (2017). Metodología para el cálculo de coeficientes de sustentación y arrastre en perfiles aerodinámicos simétricos aplicado a turbinas Darrieus. Revista Redes de Ingeniería.
- [12] Javier Enrique Martinez Ferri (2012). Análisis del Comportamiento Aerodinámico de Perfiles. Universitat Politècnica de València
- [13] Ing. Eduardo Orozco Magallon (2014) “Comparación de Herramientas de Diseño para Álabes de Aerogeneradores Eólicos de Baja Velocidad de Viento”. Universidad Autónoma Del Estado De Hidalgo Instituto De Ciencias Básicas E Ingeniería.
- [14] Hansen M. O. L. (2000). Aerodynamics of wind turbines. Published by James & James (Science Publishers) Ltd UK
- [15] Gijs van Kuik, Wim. Bierbooms. (2002) Introduction to wind energy design. Delft University Wind Energy Research Institute.
- [16] Aerogeneradores Enercon, gama de productos. ENERCON GMBH, 2009. Disponible en: http://www.enercon.de/es/_home.htm [Consulta en línea: 22/11/18]