

Diseño de formas aerodinámicas de las palas de aerogeneradores mediante algoritmos genéticos: una primera aproximación

Radi, J.^{a,*}, Djebli, A.^b, Sierra-García, J. E.^c, Santos, M.^d

^a Energetic laboratory, Department of physics, Faculty of Sciences, University of Abdelmalek Saadi Tetouan, Morocco.

^b Energetic laboratory, Department of physics, Faculty of Sciences, University of Abdelmalek Saadi Tetouan, Morocco.

^c Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, Burgos, Spain

^d Instituto de Tecnología del Conocimiento, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Spain.

To cite this article: Radi, J., Djebli, A., Sierra-García, J. E., Santos, M. 2023. Design of aerodynamic shapes of wind turbine blades using genetic algorithms: a first approach. XLIV Jornadas de Automática 2023, 12-16. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.012>

Resumen

El objetivo principal en el diseño de las palas de aerogeneradores es el uso de perfiles aerodinámicos adecuados para aumentar el rendimiento aerodinámico y disminuir el coste de la energía. El objetivo de esta investigación es emplear técnicas de optimización numérica para desarrollar perfiles aerodinámicos de aerogeneradores. Para alcanzar este objetivo, se formula un modelo matemático combinando algoritmos genéticos con el solucionador de flujo XFOIL. Se crean dos perfiles aerodinámicos distintos con características diferentes utilizando el algoritmo genético. A lo largo del procedimiento de optimización, se utiliza el software XFOIL para determinar los coeficientes de sustentación y resistencia. Este estudio confirma la viabilidad y eficacia del innovador enfoque de diseño. Además, proporciona un valioso concepto de diseño que puede aplicarse eficazmente a los perfiles aerodinámicos de aerogeneradores de espesor medio.

Palabras clave: Turbinas eólicas, aerodinámica, pala, algoritmos genéticos, XFOIL.

Designing wind turbine airfoil shapes through genetic algorithm: A first approach

Abstract

The primary goal in the aerodynamic design of wind turbines is the use of appropriate airfoils in order to increase the aerodynamic performance and to decrease the cost of energy. The goal of this research is to employ numerical optimization techniques to develop wind turbine airfoils. To attain this objective, a mathematical model is formulated by combining the genetic algorithm with the XFOIL flow solver. Two distinct airfoils with different characteristics are created using the genetic algorithm. Throughout the optimization procedure, XFOIL software is utilized to determine the lift and drag coefficients. This study confirms the viability and efficiency of the innovative design approach. Furthermore, it provides a valuable design concept that can effectively applied to wind turbine airfoils with medium thickness.

Keywords: Wind turbine, aerodynamics, airfoil, genetic algorithms, XFOIL.

1. Introducción

La energía eólica se utiliza cada vez más como fuente de energía renovable en muchos países. Hay todo tipo de diseños,

tamaños e implementaciones diferentes de aerogeneradores, en concreto de las palas, según el lugar y las condiciones del viento, así como de la capacidad de potencia y otras propiedades estructurales de las turbinas eólicas. La eficiencia

y el rendimiento de los aerogeneradores dependen en gran medida del diseño de sus perfiles aerodinámicos, por lo que es un aspecto crucial a tener en cuenta. La cantidad de energía que puede producir el viento puede verse considerablemente afectada por la forma y las propiedades del perfil aerodinámico de las palas. En consecuencia, el diseño de perfiles aerodinámicos óptimos es un área relevante de investigación en el campo de la energía eólica [1],[2],[3].

El continuo avance de las turbinas eólicas depende en gran medida del desarrollo y diseño de perfiles aerodinámicos adaptados específicamente a la aplicación de las palas. Los tipos de perfiles aerodinámicos NACA, NREL, RISO y DU siguen empleándose con frecuencia en los aerogeneradores. Sin embargo, existe una tendencia creciente hacia el desarrollo de nuevas familias de perfiles aerodinámicos, diseñados específicamente para aplicaciones en aerogeneradores [4]. La mayoría de los perfiles aerodinámicos para aerogeneradores se han desarrollado tradicionalmente utilizando procedimientos inversos convencionales, en los que se prescriben las características deseadas del flujo superficial del perfil aerodinámico en condiciones operativas específicas, y se determina la forma del perfil aerodinámico para alcanzar estas condiciones deseadas con la superficie de las palas [5]. Por lo tanto, es deseable desarrollar un modelo que ofrezca suficiente flexibilidad para describir numerosos tipos de perfiles aerodinámicos [6]. En este trabajo se propone emplear técnicas de optimización numérica para desarrollar perfiles aerodinámicos para aerogeneradores.

Para ello se emplearon algoritmos genéticos, con el fin de explorar e identificar la forma óptima del perfil aerodinámico. Un algoritmo genético funciona generando una población de soluciones potenciales para un problema determinado y, a continuación, elige los individuos más adecuados de esa población para desarrollar la siguiente generación de soluciones. El proceso se repite hasta que se encuentra una solución satisfactoria. Diversas investigaciones han utilizado algoritmos genéticos en la optimización de los perfiles aerodinámicos de los aerogeneradores. Por ejemplo, Grasso [4] presenta una discusión completa sobre la técnica de optimización del diseño numérico de los perfiles de los aerogeneradores, cuyo proceso de optimización se basa en la combinación de los algoritmos genéticos y el software RFOIL.

Quan Wang presenta un novedoso enfoque de diseño integrado para perfiles aerodinámicos de espesor medio, rendimiento aerodinámico y características de rigidez estructural [7]. Rui Yin proporciona en su artículo una estrategia de diseño óptimo para una pequeña pala de turbina eólica a través de la optimización multiobjetivo del perfil aerodinámico utilizando algoritmos genéticos e investigaciones CFD sobre el rendimiento aerodinámico en estado estacionario y no estacionario [8].

Bizzarrini et al. diseñaron de un perfil aerodinámico específico para turbinas eólicas para la región de la punta de la pala mediante algoritmos genéticos [9]. También, Ram et al. diseñaron y optimizaron la familia de perfiles USP07-45XX para un aerogenerador de 20 kW mediante algoritmos genéticos [10].

En [11] se diseña el perfil de una pala para una turbina de mar de eje horizontal. Se estudian varios perfiles NACA en función de los coeficientes de sustentación y arrastre.

Similarmente, en [12] también se optimiza pero en este caso con criterios económicos el dimensionamiento de una turbina de mar.

El objetivo principal de este trabajo es diseñar un perfil aerodinámico de aerogenerador mediante el uso de técnicas de optimización numérica. El método de diseño aerodinámico utilizado se basa en el trabajo de Ziemkiewicz [6], y el rendimiento del perfil aerodinámico se determina utilizando el código XFOIL. El diseño del perfil aerodinámico presentado en este trabajo proporciona un enfoque más directo y preciso en comparación con el método de diseño inverso tradicional [13-14].

Con el procedimiento de diseño propuesto, se han obtenidos dos perfiles aerodinámicos denominados AQ-15 y AQ-24, cada uno de ellos con un espesor específico y una relación de cuerda de 0,15 y 0,24 respectivamente.

La estructura del resto del artículo es la siguiente. En la Sección 2 se plantea el problema de optimización numérica para el perfil aerodinámico de las palas del aerogenerador. Los resultados de las formas obtenidas mediante algoritmos genéticos se muestran en la Sección 3. El trabajo termina con las conclusiones y los trabajos futuros.

2. Procedimiento de optimización numérica

Un algoritmo de optimización es un procedimiento empleado para descubrir la solución óptima para un problema dado. El objetivo de un algoritmo de optimización es minimizar o maximizar una función objetivo, que describe matemáticamente lo que se desea optimizar. Existe una amplia gama de algoritmos de optimización, cada uno con sus propios puntos fuertes, puntos débiles y ámbitos de aplicación.

Algunos algoritmos de optimización comunes incluyen: optimización basada en modelos locales, evolución diferencial (DE), optimización por enjambre de partículas (PSO), optimización multiobjetivo, etc. El método elegido para optimizar el perfil aerodinámico de la turbina eólica en esta investigación son los algoritmos genéticos. Esta técnica se basa en la evolución natural de las especies y utilizan técnicas como la mutación, el cruce y la selección para hacer evolucionar una población de soluciones candidatas hacia una solución óptima [15-16].

Los perfiles de pala utilizados en turbinas eólicas tienen su origen en aquellos utilizados en la aviación. Típicamente se agrupan en familias estandarizadas cuyo nombre es identificativo de ciertos parámetros característicos del perfil.

Se pueden emplear varios enfoques en el diseño de perfiles aerodinámicos. El proceso de diseño inverso, por ejemplo, es una estrategia ampliamente utilizada. La selección de la parametrización del perfil utilizando variables de diseño es uno de los elementos más cruciales en la optimización numérica, para lo que se han sugerido múltiples formulaciones matemáticas [4]. En el presente trabajo, las ecuaciones usadas se basan en el trabajo de Ziemkiewicz [6], descritas de forma paramétrica por las expresiones (1-2). Estas expresiones formalizan la variación de las coordenadas (X, Y) de cada punto del perfil de la pala en función del ángulo θ .

Donde B, T, P, E, C, R son las características que definen el perfil aerodinámico de la pala. Cada cambio en un parámetro afecta de forma diferente en el perfil de la pala.

$$X(\theta) = 0.5 + 0.5 \frac{|\cos(\theta)|^B}{\cos(\theta)} \quad (1)$$

$$Y(\theta) = \frac{T |\sin(\theta)|^B}{2 \sin(\theta)} (1 - X^P) + C \sin(X^E \pi) + R \sin(X 2\pi) \quad (2)$$

Esto parámetros son:

- B - Coeficiente de forma de la base: Este parámetro afecta sobre todo al borde de ataque.
- T - Espesor como fracción de la cuerda: Este término se refiere a un valor adimensional que representa el espesor del perfil aerodinámico en un punto específico a lo largo de su longitud de cuerda. Este parámetro es importante en el diseño de perfiles aerodinámicos, ya que influye en su rendimiento aerodinámico y en sus características, como las fuerzas de sustentación y resistencia. Los perfiles con diferentes relaciones grosor/cuerda se utilizan en aplicaciones específicas para lograr los requisitos de rendimiento deseados, como una gran sustentación o una baja resistencia.
- P - exponente de la conicidad. Para un valor más alto, el perfil se estrecha más bruscamente cerca del borde de salida.
- C - curvatura, este parámetro indica la relación entre la curvatura máxima y la longitud. La curvatura desempeña un papel crucial en el diseño del perfil, ya que afecta a las características aerodinámicas y al rendimiento.
- R - parámetro de reflejo. El valor positivo genera un borde de salida reflejado, mientras que el negativo emula los flaps.
- E - exponente de curvatura. Se refiere a la posición a lo largo de la longitud de cuerda en la que se produce la máxima curvatura o desviación de una línea recta en la superficie superior del perfil aerodinámico. Representa la distancia desde el borde de ataque (frontal) del perfil aerodinámico hasta el punto de máxima curvatura. La posición óptima de la curvatura máxima se determina en función de los requisitos específicos de la aplicación del aerogenerador, incluidas las condiciones de funcionamiento, la relación sustentación/arrastre deseada y la eficiencia global.

La optimización del rendimiento de la turbina como objetivo final se lleva a cabo mediante una serie de pasos secuenciales (Figura 1). En primer lugar, se crea el perfil aerodinámico utilizando las dos ecuaciones (1) y (2), y los seis parámetros que definen el perfil que se han elegido en función del espesor deseado.

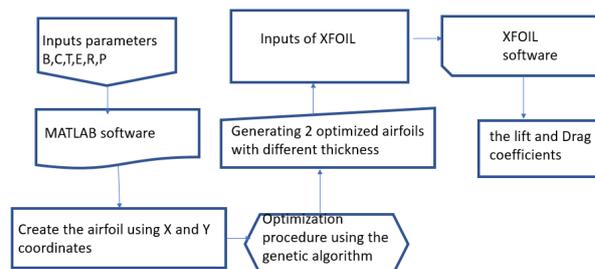


Figura 1: Proceso de optimización.

El algoritmo genético funciona codificando los parámetros del perfil aerodinámico (B, T, P, C, R, E) en una representación genética que, a continuación, se somete a operaciones evolutivas como la selección, el cruce y la mutación. Esto permite al algoritmo explorar y explotar el espacio de diseño, mejorando gradualmente el rendimiento del perfil aerodinámico a través de generaciones sucesivas.

Un elemento importante en todo el procedimiento de diseño de un perfil aerodinámico son los criterios de alta sustentación y baja resistencia aerodinámica. Por este motivo, en este trabajo se emplea como función de coste (3) el inverso del glide ratio (GLR). De esta forma se busca maximizar el GLR, buscando obtener una alta sustentación (C_L) y una baja resistencia (C_D). Una relación elevada entre los coeficientes de sustentación y resistencia puede aumentar la captación de energía y reducir su coste.

$$f = \frac{1}{GLR} = \frac{C_D}{C_L} \quad (3)$$

Mediante la aplicación iterativa de estos operadores genéticos, el algoritmo converge hacia un diseño óptimo del perfil aerodinámico, lo que se traduce en una mejora de la eficiencia y un aumento de la potencia de salida del aerogenerador. Este procedimiento de optimización se ha resumido en el diagrama que se muestra en la Figura 1. En general, el diseño de aerogeneradores mediante algoritmos genéticos tiene como objetivo lograr una extracción óptima de energía, y una mayor eficiencia global de la turbina. Como paso final se evalúa la sustentación y resistencia utilizando la herramienta de análisis XFOIL.

3. Resultados

Utilizando el algoritmo genético, se generan y optimizan dos nuevos perfiles aerodinámicos, AQ-13 y AQ-24, con espesores aproximados del 13% y el 24%, respectivamente. Se utiliza el software XFOIL para calcular las características aerodinámicas para las condiciones de trabajo (número de Reynolds $Re=1e^6$, $Ma=0$) de estos dos perfiles aerodinámicos de las palas de los aerogeneradores.

La figura 2 muestra la forma de los perfiles AQ-13 y AQ-24 que se van a utilizar en esta investigación. Los dos nuevos perfiles están diseñados para tener una elevada relación sustentación-arrastre para un ángulo de ataque comprendido entre 0 y 15° .

En las figuras 3 y 4 se representan gráficamente los coeficientes de sustentación y resistencia de los perfiles AQ-13 y AQ-24. El coeficiente de sustentación del perfil AQ-24 aumenta hasta 1,647 al aumentar el ángulo de ataque. El coeficiente de sustentación del perfil AQ-13 alcanza un coeficiente de sustentación máximo de 1,404 con un ángulo de ataque de 15. Características similares se observan en la figura 4 para el coeficiente de resistencia, podemos ver claramente que aumenta hasta 0,05161 y 0,0397 respectivamente para los perfiles AQ-13 y AQ-24.

En la figura 5 se ilustra el GLR de ambos perfiles a distintos ángulos de ataque. La máxima relación sustentación / resistencia aerodinámica para los nuevos perfiles es de hasta 107,4 para el perfil AQ-13, este valor máximo aparece en el ángulo de ataque de 8. Y para el AQ-24 el valor máximo de la relación de planeo se obtiene en 133,9 que corresponden a un ángulo de ataque de 3,5. Los resultados obtenidos concuerdan con los datos experimentales, lo que corrobora su exactitud y fiabilidad.

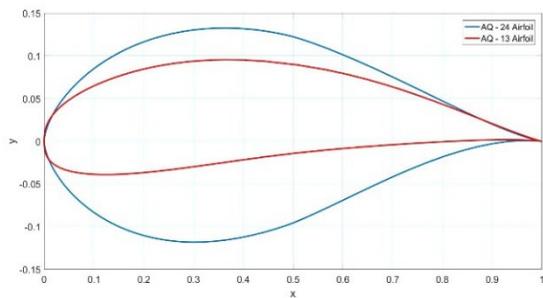


Figura 2 : los perfiles AQ-13y AQ-24.

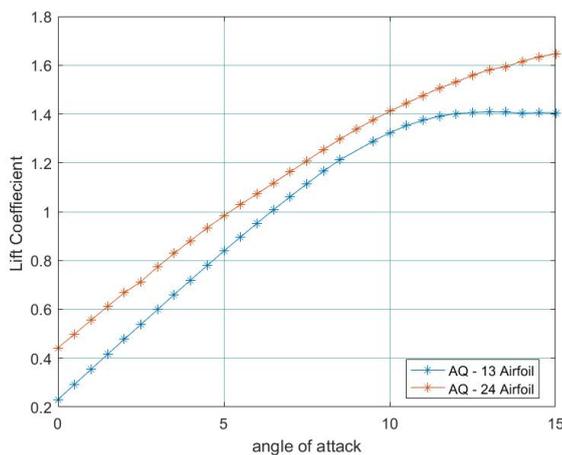


Figura 3 : Coeficiente de sustentación del perfil AQ-13 y AQ-24.

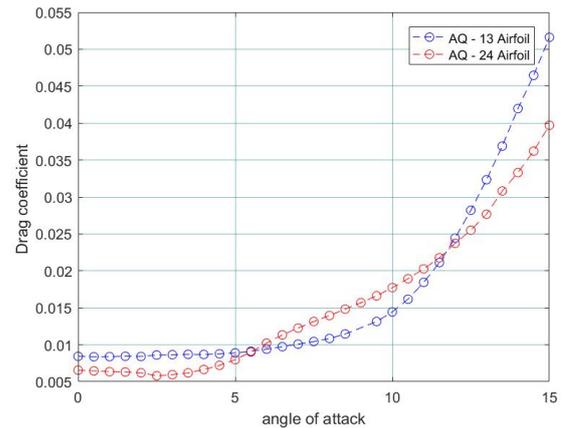


Figura 4 : Coeficiente de resistencia aerodinámica de los perfiles AQ-13 y AQ-24

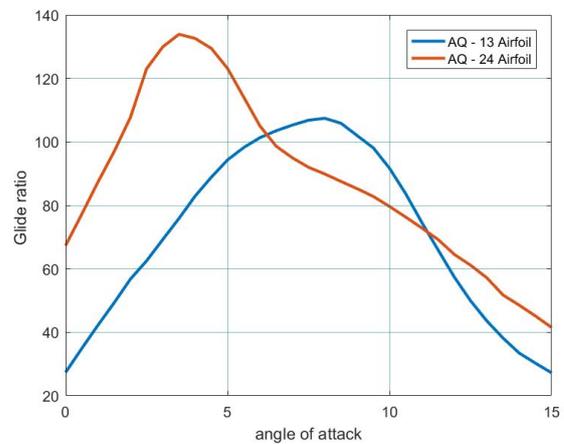


Figura 5 : Relación de planeo de los perfiles AQ-13 y AQ-24

4. Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo se ha empleado un modelo matemático con sólo seis parámetros para describir la forma del perfil aerodinámico. Aplicando este método, se han diseñado dos perfiles aerodinámicos denominados AQ-15 y AQ-24, cada uno de ellos con un espesor específico y una relación de cuerda de 0,15 y 0,24 respectivamente.

El rendimiento de los nuevos perfiles diseñados (los coeficientes de sustentación y resistencia) se evalúa empleando el software XFOIL con un número de Reynolds de $1e^6$. La flexibilidad de este enfoque permite la aproximación de una amplia gama de perfiles existentes, y su simplicidad lo hace muy adecuado para la optimización mediante el algoritmo genético. Los resultados indican que el método propuesto es práctico y viable para diseñar perfiles aerodinámicos de aerogeneradores.

Como trabajos futuros cabe destacar el empleo de otras ecuaciones para modelar los perfiles de pala y probar con otras técnicas de optimización como los algoritmos de enjambre de partículas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación español en el marco del proyecto MCI/AEI/FEDER PDI2021-123543OB-C21.

Referencias

- [1] Bashir, Mohamed Bashir Ali. "Principle parameters and environmental impacts that affect the performance of wind turbine: an overview." *Arabian Journal for Science and Engineering* 47.7 (2022): 7891-7909.
- [2] Radi, Jinane, et al. "Design And Simulation of a Small Horizontal Wind Turbine Using MATLAB and XFOIL." *WWME 2022 IV. Jardunaldia-Berrikuntza eta irakaskuntza energia berriztagarrien aurrerapenetan. Servicio Editorial= Argitaletxe Zerbitzua*, 2023.
- [3] Radi, Jinane, and Abdelouahed Djebli. "Optimal design of an horizontal axis wind turbine using blade element momentum theory." *E3S Web of Conferences*. Vol. 336. EDP Sciences, 2022
- [4] Grasso, F. (2011). Usage of numerical optimization in wind turbine airfoil design. *Journal of Aircraft*, 48(1), 248-255.
- [5] Chen, J., Wang, Q., Zhang, S., Eecen, P., & Grasso, F. (2016). A new direct design method of wind turbine airfoils and wind tunnel experiment. *Applied Mathematical Modelling*, 40(3), 2002-2014.
- [6] Ziemkiewicz, D. (2016). Simple analytic equation for airfoil shape description. *arXiv preprint arXiv:1701.00817*.
- [7] Wang, Q., Huang, P., Gan, D., & Wang, J. (2019). Integrated Design of Aerodynamic Performance and Structural Characteristics for Medium Thickness Wind Turbine Airfoil. *Applied Sciences*, 9(23), 5243
- [8] Yin, R., Xie, J. B., & Yao, J. (2022). Optimal design and aerodynamic performance prediction of a horizontal axis small-scale wind turbine. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022
- [9] Bizzarrini, N., Grasso, F., & Coiro, D. P. (2011). Genetic algorithms in wind turbine airfoil design. *EWEA, EWEC2011, Bruxelles, Belgium*, 14-
- [10] Ram, K. R., Lal, S. P., & Ahmed, M. R. (2019). Design and optimization of airfoils and a 20 kW wind turbine using multi-objective genetic algorithm and HARP_Opt code. *Renewable Energy*, 144, 56-67.
- [11] Olivares, I., Santos, M., & Tomás Rodríguez, M. (2018). Análisis para el diseño de las palas de una turbina marina. In *XXXIX Jornadas de Automática* (pp. 430-435). Área de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Extremadura.
- [12] Lillo, D., Santos, M., Esteban, S., López, R., & Guijjarro, M. (2019). Modelización, simulación y evaluación técnico-económica de una turbina de mar. In *XL Jornadas de Automática* (pp. 24-31). Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións.
- [13] Xudong, W., Licun, W., & Hongjun, X. (2015). An integrated method for designing airfoils shapes. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015.
- [14] Hajek, J. (2007). Parameterization of airfoils and its application in aerodynamic optimization. In *WDS* (Vol. 7, pp. 233-240).
- [15] Galletly J. (1992). An overview of genetic algorithms. *Kybernetes*, 21 (6), 26-30.
- [16] Hajek, J. (2007). Parameterization of airfoils and its application in aerodynamic optimization. In *WDS* (Vol. 7, pp. 233-240).