

Ciencia Nicolaita 89

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Proceso de conformación de una función objetivo de los álabes de una turbina de viento usando el diseño óptimo

Process of forming an objective function of the blades of a wind turbine using the optimal design

Josué Jordi Zavala Morales*, Erasmo Cadenas Calderón, Rafael Campos Amezcua

Para citar este artículo: Zavala Morales Josué Jordi, Cadenas Calderón Erasmo, Campos Amezcua Rafael, 2023. Proceso de conformación de una función objetivo de los álabes de una turbina de viento usando el diseño óptimo. Ciencia Nicolaita no. 89, 196-207. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi89.717>



Historial del artículo:

Recibido: 17 de mayo de 2023

Aceptado: 12 de julio de 2023

Publicado en línea: diciembre de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: 1731329j@umich.mx



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



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



Proceso de conformación de una función objetivo de los álabes de una turbina de viento usando el diseño óptimo

Process of forming an objective function of the blades of a wind turbine using the optimal design

Josué Jordi Zavala Morales^{a*}, Erasmo Cadenas Calderón^a, Rafael Campos Amezcua^b

^aFacultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Doctorado en Ingeniería Mecánica.

^bCentro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Tecnológico Nacional de México.

Resumen

En el presente trabajo se muestra el proceso de la conformación de una función objetivo de los álabes de una turbina de viento usando el diseño óptimo. La aportación principal es la función matemática tridimensional, la cual permite generar múltiples diseños que optimizan la masa del álabes, bajo restricciones que se encuentran en el dominio del esfuerzo de Von Mises y la velocidad específica. La teoría BEM es utilizada en el diseño aerodinámico y estructural de los álabes. Se tomaron como parámetros una potencia en la turbina de 12.5 kW y un perfil aerodinámico NRELS818. Se realizaron simulaciones de elemento finito, utilizando tres hipótesis de carga, bajo la norma IEC 61400-2, con el objetivo de conocer el comportamiento mecánico de los álabes. Los resultados mostraron que la función objetivo obtenida es adecuada con base en los estadísticos de ajuste con valores de SSE=0.094 y R-cuadrado ajuste = 0.9929. Dicha función, permitió la generación de 23 diseños adicionales, en una región de diseño de los álabes en la cual co-existen aquellos con diferentes masas que satisfacen las restricciones de diseño. Lo anterior, se puede utilizar como apoyo para generar álabes de turbina de viento en condiciones óptimas y disminuir los costos de manufactura.

Palabras clave: Diseño óptimo, turbinas de viento, función objetivo.

Abstract

This paper shows the process of shaping a wind turbine blade objective function using the optimal design. The main contribution of the work is the three-dimensional mathematical function, which allows generating multiple designs that optimize the blade mass, under constraints that are in the domain of the Von Mises stress and the tip speed ratio. The BEM theory is used in the aerodynamic and structural design of the blades. Turbine power of 12.5 kW and airfoil NRELS818 were taken as parameters. Finite element simulations were performed, using three load hypotheses, under the IEC 61400-2 standard, in order to know the mechanical behavior of the blades. The results showed that the objective function obtained is adequate based on the adjustment statistics with

values of $SSE=0.094$ and $R\text{-squared adjusted}=0.9929$. This function allowed the generation of 23 additional designs, in a design region of the blades in which co-exist those designs with different masses that satisfy the design constraints. This should be used as a support to generate wind turbine blades in optimal conditions and reduce manufacturing costs.

Keywords: Optimal design, wind turbines, objective function.

Introducción

Las fuentes de energías renovables han tenido una participación notable en los últimos 10 años, fuentes como la energía eólica empiezan a tener un papel más importante alrededor del mundo para la producción de energía eléctrica. Las turbinas modernas buscan aprovechar de una mejor forma el potencial del viento. Gracias a las investigaciones científicas y a la ingeniería, se han tenido avances significativos en esta área, los cuales han impulsado a la energía eólica a nivel mundial reduciendo los costos de las turbinas con el paso de los años (IRENA, 2016). La implementación de parques eólicos a gran escala, ha resultado en la búsqueda de nuevas herramientas para potenciar la extracción de energía eólica y en la optimización de las turbinas de viento. El aumento de tamaño de los rotores, se traduce en una mayor captación del viento, pero contar con aerogeneradores de dimensiones mucho más grandes implica medidas de durabilidad y rendimiento estructural más exigentes (IRENA, 2019). Tomando en cuenta estas consideraciones, el diseñar una turbina de viento se vuelve un problema complejo, es por ello que se ha convertido en un problema de optimización en donde se tienen restricciones de diseño y una función objetivo.

En la optimización de turbinas de viento, se utilizan diferentes técnicas y teorías para lograr la máxima potencia de salida posible. En el diseño clásico de una turbina, se ha usado la teoría de BEM en función de su velocidad específica, también usando métodos numéricos y funciones de costo para maximizar la producción anual de energía (Gur y Rosen, 2008). Existen modelos que optimizan la distribución de la cuerda y el ángulo de torcimiento en las turbinas de eje horizontal, la optimización aerodinámica se obtiene al maximizar el coeficiente potencia mediante un algoritmo (Déborah, 2013). Se muestra un modelo de optimización para minimizar el peso y las vibraciones y maximizar la rigidez (Karam y Hani, 2017). Un método para minimizar el costo de energía (COE) ocurre en turbinas

de viento offshore, en donde se optimiza la velocidad del viento y el radio del rotor por medio de un algoritmo (Longfu, 2018). También se usa un algoritmo evolutivo en combinación del software ANSYS para encontrar el mejor coeficiente de potencia, empleando la optimización para encontrar la mejor forma del perfil aerodinámico (Mohamed, 2010) y con la ayuda de un algoritmo genético en una turbina de eje horizontal como método de optimización, considerando la generación de potencia como su función objetivo, los algoritmos genéticos se basan en mecanismos de selección natural (Mojtaba, 2014).

En los últimos años el constante uso de los combustibles fósiles han sido los principales causantes del cambio climático que afronta nuestro planeta. Ante esta problemática se han desarrollado diferentes soluciones con el propósito de frenar o disminuir los efectos negativos del CO_2 . En años recientes la implementación de las energías verdes, ha permitido aprovechar los recursos renovables, tal es el caso de la energía eólica, que busca aprovechar el potencial del viento en la generación de energía eléctrica. En gran parte del mundo, las energías renovables se han convertido en una fuente económica de generación de energía, en el caso de la energía eólica, se han tenido avances prometedores en la disminución de su costo hasta llegar a ser proyectos rentables y estos costos seguirán disminuyendo con futuros avances tecnológicos.

El enfoque de este trabajo es obtener la función objetivo de los álabes de una turbina de viento de baja capacidad para un perfil aerodinámico NRELS818, usando las variables de la velocidad específica y los esfuerzos de Von Mises, con la finalidad de obtener una función matemática con la capacidad de generar múltiples diseños óptimos que satisfacen las restricciones de diseño.

Metodología

La teoría BEM se utiliza en la metodología de diseño de los álabes de una turbina de viento, los cuales fueron ensamblados en modelos 3-D mediante el uso de software CAD Solidworks y ANSYS.

El rotor es una de las partes principales de una turbina de viento, con propiedades mecánicas y aerodinámicas, es una parte fundamental entre la interacción del viento y el rotor de la turbina, siendo un factor importante en la producción de energía. El análisis clásico de una turbina de viento se reportó por Wilson y Lissaman (1974), los autores analizaron el rendimiento aerodinámico usando la teoría de momento axial, en donde se asume que el viento es un flujo unidimensional sin viscosidad e incompresible. La teoría BEM en conjunto con la teoría de momento axial, permiten realizar un estudio más detallado del rendimiento de una turbina de viento (Glauert, 1976). Trabajos más recientes en donde se ha implementado la teoría BEM en conjunto con algoritmos, demuestran resultados interesantes, tal es el caso de Özkan *et al.*, (2023) en donde optimizan la geometría aerodinámica del aspa de un aerogenerador de baja capacidad usando un algoritmo de colonias de abeja artificial en conjunto con la teoría BEM. El-Shahat *et al.*, (2022) presentan un modelo de la teoría BEM modificado para turbinas de corriente de marea, el modelo es combinado con teorías de ondas lineales y no lineales, mejorando el empuje de la turbina y disminuyendo los momentos de flexión.

Teoría BEM

Este método nace de la combinación de la teoría de pala y de momento, la cual permite calcular las fuerzas a las cuales se ve sometida el álabes de una turbina de viento. El álabes es dividido en una serie de secciones, para ello se asume que no hay interacción aerodinámica entre los elementos, las fuerzas en el álabes son determinadas únicamente por las características de sustentación y arrastre del perfil aerodinámico (**Fig. 1**). El método permite calcular diferentes características como: el empuje, la potencia, el par, etc. La fuerza normal, dF_N y la fuerza de empuje, dF_T se encuentran relacionadas con las fuerzas de sustentación y de arrastre, dF_L y dF_D .

$$dF_N = dF_L \cos\phi + dF_D \sin\phi \quad (1)$$

$$dF_T = dF_L \sin\phi - dF_D \cos\phi \quad (2)$$

La fuerza normal neta y el torque creado por la fuerza tangencial, desde el centro del rotor, quedan expresadas en función de los coeficientes de sustentación y de arrastre:

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho U_r^2 e_l (\cos\phi + dF_D \sin\phi) dr \quad (3)$$

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho U_r^2 e_l (\sin\phi - dF_D \cos\phi) cdr \quad (4)$$

Las fuerzas dF_L , dF_D , dF_N , dF_T y dQ , Fig.2, que son desarrolladas con la teoría de momento y la teoría de pala, pueden consultarse en la referencia (Manwell,

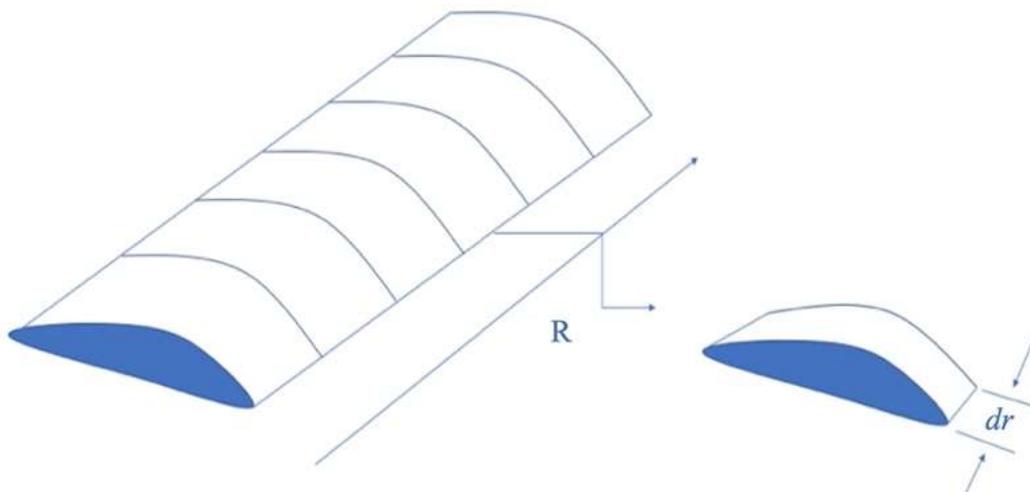


Figura 1. Elemento de aspa.

2009). Las ecuaciones (1), (2), (3) y (4), son las expresiones principales para llevar a cabo el diseño del aspa de una turbina de viento, en el procedimiento el elemento es dividido en secciones y se asume un factor de inducción axial inicial (**Fig. 2**).

De las ecuaciones de momento y de la teoría de elemento de pala se pueden derivar expresiones que incluyen a los coeficientes de inducción axial y radial.

$$a = \frac{1}{[1 + 4se^{-2\phi/\sigma'} C_l \cos\phi]} \quad (5)$$

$$a' = \frac{1}{[(4\cos\phi/\sigma' C_l) - 1]} \dots \quad (6)$$

Proceso de diseño

El diseño del aspa inicia con la selección de los parámetros del rotor y la selección del perfil aerodinámico, el perfil seleccionado en este trabajo fue el NRELS818 (**Fig. 3**), que forma parte de una familia de perfiles desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL). Este perfil mantiene un buen rendimiento en un rango de operación amplia y presenta una baja sensibilidad a los efectos de rugosidad.

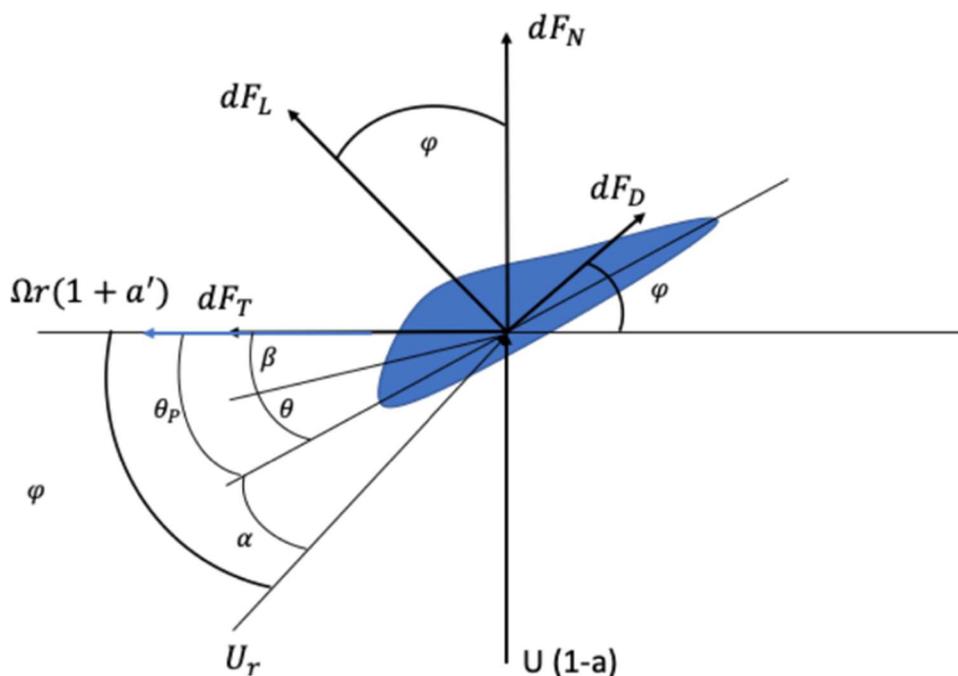


Figura 2. Geometría de álabes para el análisis de una turbina de eje horizontal.

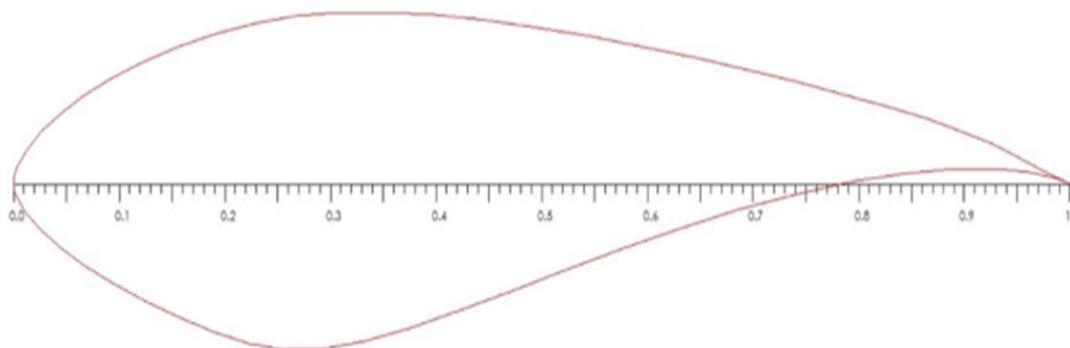


Figura 3. Perfil aerodinámico NRELS818 (NREL, 2014).

En base a la teoría BEM se establece una metodología para diseñar 3 álabes de una turbina de viento usando el perfil aerodinámico NRELS818. Este perfil es simulado en el software QBlade, el cual permite conocer su comportamiento aerodinámico (Brøndsted, 2005).

Los siguientes parámetros fueron considerados en el diseño: una velocidad de nominal del viento de 12 m/s, una temperatura de 25 °C, una densidad del aire promedio de 1.28 kg/m^3 y una viscosidad dinámica de $1.8490 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ y un número de Reynolds de 8.3072×10^{-5} .

El rango de velocidades específicas para los diseños es de $\lambda = 8 - 10$, ya que para la generación de energía eléctrica los rangos de la velocidad específica se encuentran entre $\lambda = 4 - 10$ (Manwell, 2009). El modelado de los álabes en 3 dimensiones se llevó a cabo usando el programa Solidworks, en la **Tabla 1**, se muestran las características de los 3 álabes diseñados. En la **Fig. 4**, se muestra uno de los álabes diseñados en el programa. Solidworks permite obtener la masa de los álabes a través de sus herramientas de trabajo, el material seleccionado para los 3 diseños de aspas fue Glass-E (Brøndsted, 2005), con una rigidez de 38 GPa, una resistencia a la tracción de 1800MPa y una densidad de 1.87 g/cm^3 .

Análisis por elemento finito

El análisis por elemento finito nos permite analizar el desempeño mecánico de cada álabe bajo diferentes condiciones de carga, estas simulaciones nos brindan

la información adicional necesaria para complementar el estudio y la metodología de diseño óptimo (Chakrabarty, 2016; Jensen y Branner, 2013).

El diseño de los álabes en el programa ANSYS se realiza con los parámetros obtenidos de los cálculos de la teoría BEM (**Fig. 5**). Los 3 diseños de álabes son modelados en este programa, con el propósito de realizar el análisis de elemento finito (Thompson y Thompson, 2017).

En el diseño de un aerogenerador es importante tomar en cuenta las condiciones a las cuales estará sometido durante su operación. La norma IEC 61400-2 considera aspectos como el montaje, el izado, el mantenimiento y los modos de funcionamiento bajo condiciones extremas. En este trabajo, las hipótesis de carga A, la hipótesis de carga D y la hipótesis de carga E fueron usadas en el análisis, porque representan las condiciones usuales a las cuales se ve expuesto un aerogenerador (IEC, 2015).

En las simulaciones, el esfuerzo de Von Mises nos indica cuando un elemento estructural falla debido al sobrepaso de su energía de distorsión (de La Fuente, 2009). Las soluciones obtenidas por cada carga suministrada se muestran a través de una representación sobre el modelo, (**Fig. 6**).

Diseño óptimo

El diseño de un sistema puede ser formulado como un problema de optimización, en donde el rendimiento de las variables de diseño es optimizado mientras todos los demás requisitos se cumplen mediante métodos y conceptos de optimización (Arora, 2012).



Figura 4. Aspa diseñada en Solidwork.

Tabla 1
Características de los modelos de 3 aspa. Se muestran las diferencias entre los pesos de cada aspa.

Álabe	Perfil	Velocidad específica	Masa(kg)	Longitud (m)
1	NRELS818	8	8.20	2.94
2	NRELS818	9	6.32	2.94
3	NRELS818	10	4.38	2.94



Figura 5. Modelo de aspa diseñada en ANSYS.

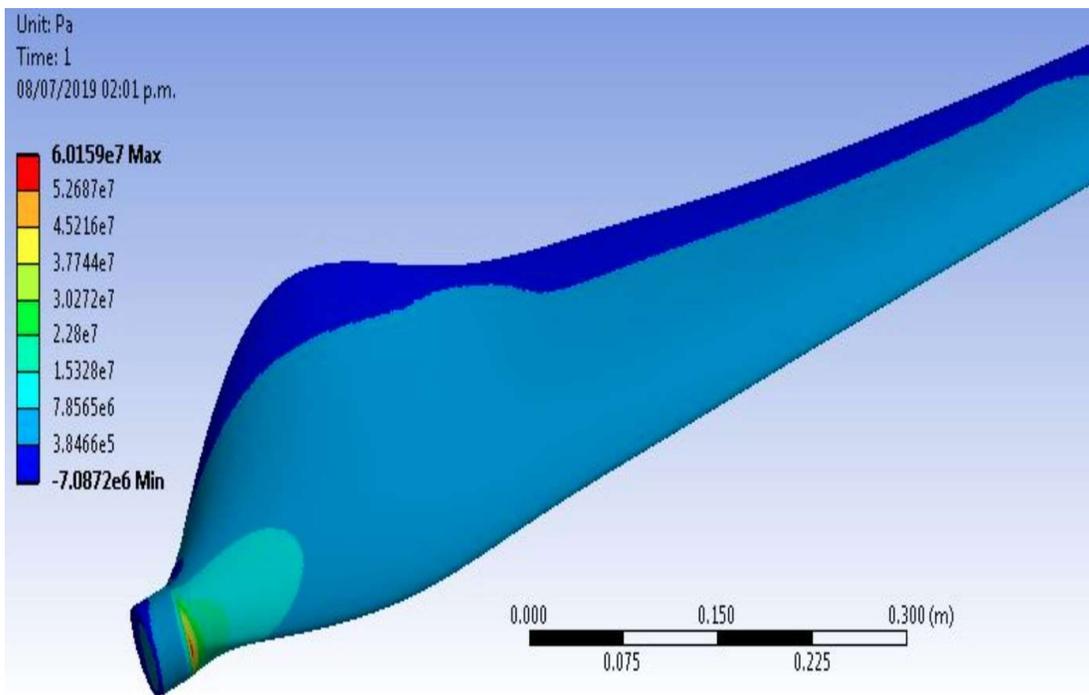


Figura 6. Esfuerzo de Von mises en el aspa 1.

Se puede derivar una expresión matemática para un diseño óptimo que abarque todas estas posibilidades.

Un vector $n \times x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ de variables de diseño para minimizar o maximizar la función objetivo:

$$f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \tag{7}$$

que esté sujeto a las restricciones de igualdad r :

$$h_j(x) = h_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0; j = 1 \dots r \tag{8}$$

y las restricciones de desigualdad w :

$$g_i(x) = g_i(x_1, \dots, x_n) \leq 0; i = 1 \dots w \tag{9}$$

La mayoría de los problemas de diseño se encuentran sujetos a restricciones. Un conjunto factible de soluciones para un diseño óptimo es una colección de propuestas que satisfacen todas las restricciones y este se representa con la letra R .

$$R = \{x \mid h_j(x) = 0, j = 1 \dots r; g_i(x) \leq 0, i = 1 \dots w\} \tag{10}$$

El conjunto de diseños factibles se denomina región factible, especialmente para problemas de optimización con dos variables de diseño. La región factible generalmente se reduce cuando se agregan más restricciones al modelo y se expande cuando se eliminan algunas restricciones. Cuando la región factible se reduce, también se reduce el número de diseños posibles que pueden optimizar la función objetivo; es decir, hay menos diseños factibles.

Formulación del Diseño Óptimo de los álabes de una Turbina de Viento

La correcta formulación del problema es importante, no olvidar incluir restricciones en la formulación, de esta forma la solución se encontrará dentro de la región factible. La formulación del problema de diseño óptimo se conforma de los siguientes pasos:

1. Descripción del proyecto/problema: Diseñar un álabe de una turbina de viento, con una masa mínima y siguiendo las 3 hipótesis de carga simplificadas.

2. Recopilación de datos e información: una velocidad de viento de 12m/s , una temperatura de 25°C , una densidad del aire promedio de 1.28kg/m^3 , una viscosidad dinámica de $1.8490 \times 10^{-5}\text{kg/ms}$ y un Reynolds de 8.3072×10^5 . La longitud del ábabe es de 2.938 m , el material asignado en los álabes es Glass-E con una rigidez de 38 Gpa , que tiene una resistencia a la tracción de 1800Mpa y una densidad de 1.87g/cm .
3. Definición de las variables de diseño: esfuerzos de Von Mises y velocidad específica.
4. Criterio de Optimización: Una función matemática de la masa de los álabes en el dominio de la velocidad específica y el esfuerzo de von mises. La cual puede ser minimizada o maximizada.
5. Formulación de restricciones: Entre las restricciones designadas se tienen la velocidad específica, con un rango de $8\text{-}10$ y los valores de esfuerzos obtenidos de las simulaciones de análisis de elemento finito; esfuerzo de Von Mises con rangos de $9.0548 \times 10^8\text{Pa}$ a $1.3088 \times 10^7\text{Pa}$. Estas dos variables son expresadas como restricciones de desigualdad.

Resultados

Función objetivo de los alabes de una turbina de viento

La función objetivo es el criterio con el cual se optimiza un sistema, este criterio tiene que ser una función escalar, donde un valor numérico es obtenido

cuando el diseño satisface todas las restricciones. Para obtener la función objetivo del diseño de un ábabe de turbina de viento, se gráfica una superficie en 3 dimensiones de la función de la masa en el dominio de la velocidad específica (λ) y del esfuerzo de Von mises (σ). La ecuación de la función objetivo se obtiene al encontrar el polinomio que describe a esta superficie. Al sólo contar con 3 diseños o puntos dentro de la gráfica (**Fig. 7**), es necesario encontrar más de estos puntos o diseños que conforman a la superficie, de esta forma la aproximación del polinomio que describe a esta función será más precisa.

La técnica de la distancia inversa ponderada es un método matemático que usa las distancias que hay del punto que se desea conocer hacia los puntos conocidos. Con 3 valores conocidos dentro de los límites de la función es posible obtener más valores o puntos desconocidos dentro de la superficie de la función objetivo por medio de esta técnica (GIS, 2021; Lu y Wong, 2008; Shi, 2020; Shukla, 2019). Entre más cercanos sean los puntos conocidos de los puntos que se desea encontrar, la aproximación será más exacta. La fórmula para la distancia inversa ponderada es la siguiente:

$$Z_p = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{z_i}{d_i^p} \right)}{\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{d_i^p} \right)} \quad (11)$$

En la **Tabla 2** los primeros 3 puntos (A, B, C) son los 3 diseños de álabes iniciales, el resto de los puntos

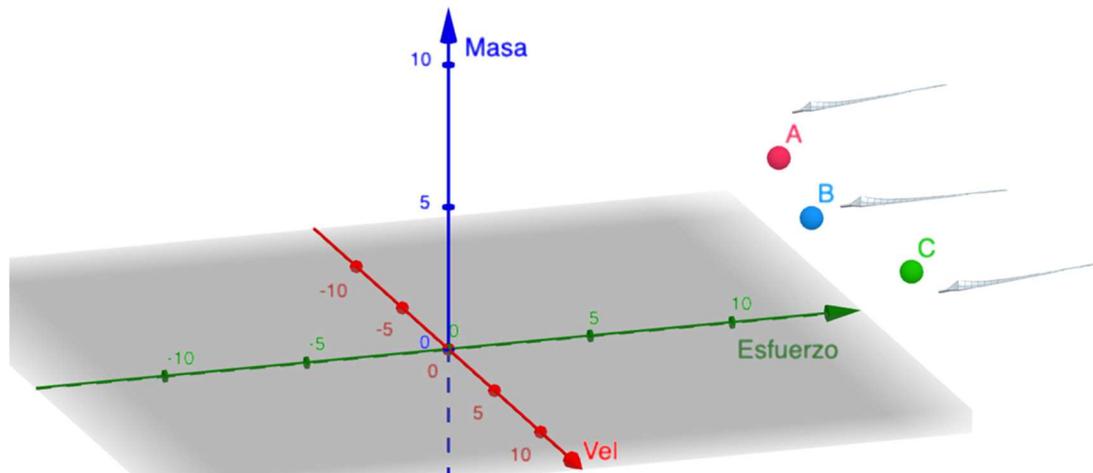


Figura 7. Diseños iniciales graficados en 3D.

Tabla 2

Puntos obtenidos con la técnica de la distancia inversa ponderada.

Point	x	y	z	Point	x	y	z
A	8.0	90.5	8.2	11	9.5	130.8	4.5
B	9.0	98.8	6.3	12	9.0	130.8	4.6
C	10	130.8	4.4	13	8.5	120.7	5.7
1	9	110.6	6.3	14	8.5	130.8	4.7
2	8.5	100.5	6.7	15	8.0	120.7	5.8
3	8.5	110.6	6.3	16	8.0	130.8	4.8
4	8	100.5	6.7	17	9.0	100.5	6.6
5	8	110.6	6.3	18	10.0	120.7	5.5
6	8.5	90.5	8.1	19	10.0	110.6	6.2
7	9	90.5	7.9	20	9.5	100.5	6.6
8	9.5	110.6	6.3	21	10.0	100.5	6.5
9	9.5	120.7	5.6	22	9.5	90.5	7.8
10	9.0	120.7	5.7	23	10.0	110.6	6.3

fueron calculados usando la Ec. 11 de la distancia inversa ponderada, obteniendo 23 puntos adicionales, de un total de 26 puntos. En la **Fig. 8** se muestran los 26 puntos que conforman a la función objetivo.

Se obtiene la gráfica, Fig. 8, de la función objetivo con los 3 puntos (A, B, C) de los diseños iniciales y también se grafican los 23 puntos obtenidos con la técnica de la distancia inversa ponderada.

En la **Fig. 8** se aprecia cada uno de los puntos que conforma a la función objetivo, cada uno de ellos representa un diseño de álabes óptimo que cumple con

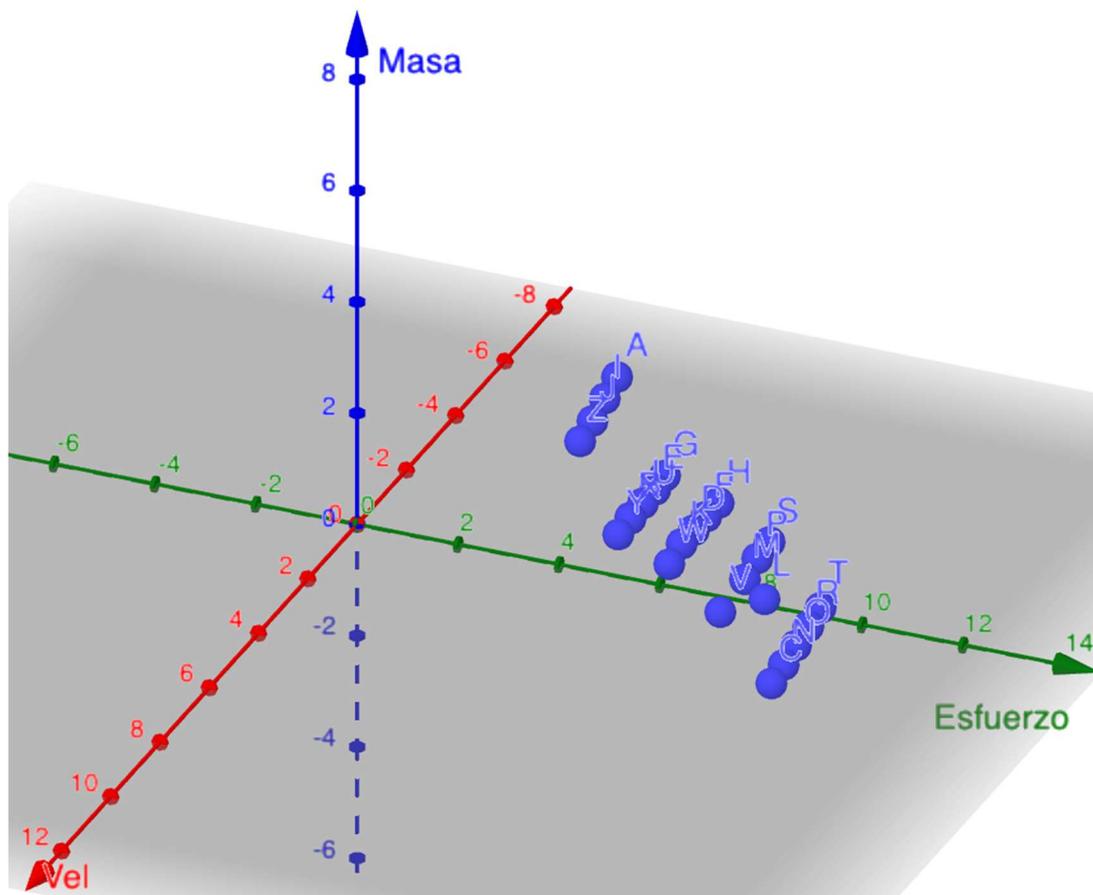


Figura 8. Gráfica de la función objetivo con 26 puntos en 3D.

las restricciones de diseño, es decir, ahora se cuenta con 26 diseños factibles partiendo de 3 diseños iniciales. Se encontró una expresión matemática que describe a la superficie en 3D, por medio de una interpolación polinómica con la aplicación Curve Fitting Toolbox del software Matlab. Para evaluar la certeza del ajuste, se usan los siguientes indicadores estadísticos:

- Suma de cuadrados por error (SSE): un valor cercano a 0 indica que el modelo tiene un componente de error aleatorio más pequeño, y que el ajuste será más útil para la predicción.
- R-Cuadrado (R^2): solo puede tomar valores entre 0 y 1, cuando el valor se encuentra más cercano a 1 indica una mayor varianza en el modelo.
- R-cuadrado ajustado: indica la calidad del ajuste, solo puede tomar valores menores o igual a 1, valores cercanos a 1 indican un mejor ajuste.
- Error Cuadrático Medio (MSE): hace una estimación de la desviación estándar del componente aleatorio en los datos, valores cercanos a 0 indican un ajuste más útil para la predicción.

Las fórmulas para evaluar la bondad del ajuste pueden ser consultadas en la Ref. (Math works, 2019).

Con estos indicadores estadísticos se encuentra un modelo apto que se ajuste adecuadamente a los datos. Los valores para cada uno de los estadísticos mencionados son: SSE = 0.0949, R-square= 0.9969, Adjusted R -square= 0.9929 y RMSE = 0.0928. De acuerdo a los resultados estadísticos, se puede concluir que el ajuste que realiza el programa es aceptable. Una vez

que el programa hace la aproximación, también se obtienen los valores de los coeficientes del polinomio que representan a la función:

$$f = 910.1 + 47.5x - 349.3y - 13.51x^2 + 8.377xy + 41.95y^2 + 1.008x^3 + 0.007295x^2y - 0.7167xy^2 - 2.216y^3 - 0.02554x^4 - 0.008621x^3y + 0.009702x^2y^2 + 0.0151xy^3 + 0.04433y^4 \quad (12)$$

En la **Fig. 9** se puede apreciar la superficie en 3D de la función objetivo, a la cual se le aplica una interpolación polinómica, como resultado se obtiene la ecuación matemática, Ec. 12, la cual puede ser maximizada o minimizada. Al evaluar la ecuación de la función objetivo con diferentes valores de velocidad específica y esfuerzos de Von mises, se obtienen diferentes valores de masa, los cuales corresponden a los diferentes posibles diseños de aspas que coexisten dentro de la función.

Conclusiones

La optimización de las turbinas de viento se ha vuelto un problema complejo, lo cual ha generado la necesidad de incorporar nuevas herramientas, como la metodología del diseño óptimo y la técnica de la distancia inversa ponderada, con las cuales se obtuvo la ecuación de la función objetivo, cuyos estadísticos de prueba de SSE=0.094 y R-cuadrado ajustado =0.9929 validan bondad del ajuste. También se consigue un sistema que permite al diseñador manejar la cantidad de variables necesarias y sus respectivas restricciones,

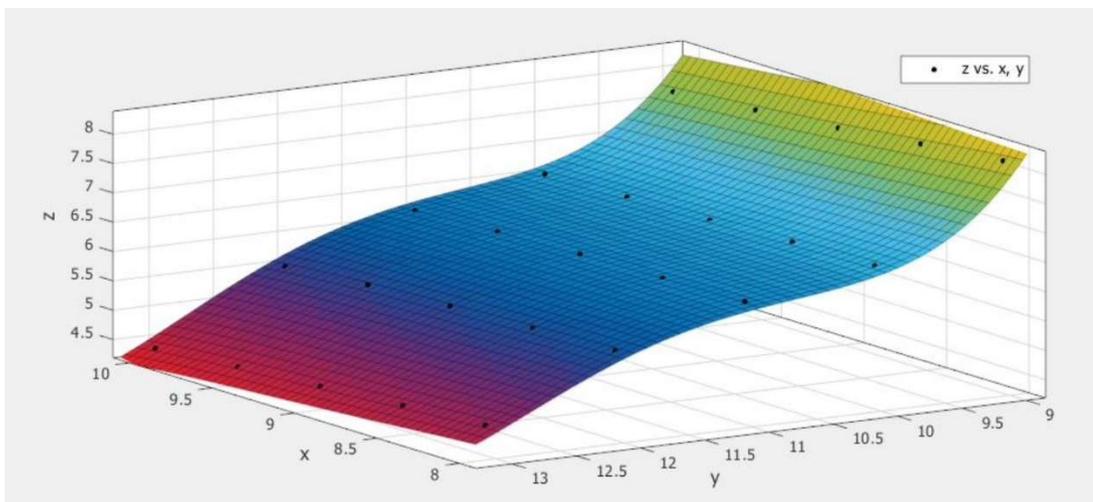


Figura 9. Superficie de la función objetivo.

este enfoque otorga flexibilidad y factibilidad, en una función objetivo generada. La metodología permitió obtener 23 puntos o diseños dentro de la región de diseño, partiendo de solo 3 diseños de aspas iniciales. La función objetivo de la masa de los álabes de una turbina de viento, brinda una región de diseño factible, en el cual coexisten una diversidad de diseños técnicamente correctos, entre los cuales se encuentran el máximo y mínimo globales, que nos indican aquellos diseños con la menor y mayor masa.

Referencias

- Arora JS. 2012. Introduction to optimum design, Elsevier, ISBN: 978-0-12-381375-6.
- Brøndsted P, H. Lilholt, A. Lystrup. 2005. Composite materials for wind power turbine blades., Annual Review of Materials Research 35: 505–538.
- Chakrabarty, Mannan, Cagin. 2016. Multiscale modeling for process safety applications, Butterworth-Heinemann, ISBN: 9780123969750.
- Déborah A, Jerson R, André L, Joao T, Antonio C. 2013. Optimum aerodynamic design for wind turbine blade with a rankine vortex wake, Renewable Energy 55:296–304.
- De la Fuente E. 2009. Von mises stresses in random vibration of linear structures, Computer and Structures 87:1253–1262.
- El-Shahat S, Fu L, Li G. 2022. Linear and non-linear wave theories coupled with a modified BEM model for quantifying dynamic loads of a tidal stream turbine, Ocean Engineering, 243, 110334.
- GISGeography, Inverse distance weighting interpolation, <https://gisgeography.com/inverse-distance-weighting-idw-interpolation/>, [consultado el 10 de agosto de 2022].
- Glauert H. 1976. Airplane propellers, in division of aerodynamic theory, W. F. Durand, ed., Springer-Verlag.
- Gur O, Rosen A. 2008. Optimal design of horizontal axis wind turbine blades, ASME.
- IEC 61400-2-2015 wind turbines design requirements for small wind turbines, 2015.
- IRENA. 2019. Future of wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation paper), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA. 2016. Wind power technology brief, <https://www.irena.org/publications/2016/Mar/Wind-Power> [consultado el 13 de junio de 2022].
- Lu GY, Wong DW. 2008. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique, Computers and Geosciences 34:1044-1055.
- Longfu L, Z. Xiaofeng, S. Dongran, T. Weiyi, Y. Jian, L. Li, T. Xiaoyu, WW. 2018. Optimal design of rated wind speed and rotor radius to minimizing the cost of energy for offshore wind turbines, Energies, 10, 2728.
- Manwell JF, McGowan AL, Rogers JG. 2009. Wind Energy Explained, Wiley, Chichester, England.
- MathWorks, evaluar la bondad del ajuste, <https://la.mathworks.com/help/curvefit/evaluating-goodness-of-fit.html>, [consultado el 5 de septiembre de 2022].
- Mohamed M, E. Janiga, E. Pap, D. Thévenin. 2010. Optimal blade shape of a modified savonius turbine using an obstacle shielding the returning blade, Energy Conversion and Management, 52: 236–242.
- Mojtaba L, Tahmine S, Kiana R, Pouria A, Aerodynamic. 2013, optimal design of wind turbine blades using, genetic algorithm, Energy Equipment and Systems, 2, 185–193.
- Karam Y, M. Hani. 2017. Optimal frequency design of wind turbine blades, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics p. 90, 961–986.
- Molholt Jensen F, Branner K. 2013. Introduction to wind turbine blade design, Design and Materials 3–28.
- NREL, Nrel's s818 airfoil graphic and coordinates, https://wind.nrel.gov/airfoils/shapes/S818_Shape.html, [consultado el 5 de julio de 2022]
- Özkan R, Serdar Genç. 2023. Aerodynamic design and optimization of a small-scale wind turbine blade using a novel artificial bee colony algorithm based on blade element momentum (ABC-BEM) theory, Energy Conversion and Management, Volume 283,116937, ISSN 0196-8904.
- Shi Y, He W, Zhao J, Hu A, Pan J, Wang H, Zhu H. 2020. Expected output calculation based on inverse distance weighting and its application in anomaly detection of distributed photovoltaic power stations, Journal of Cleaner Production 253: 119965.
- Shukla K, Kumar P, Mann GS, Khare M. 2019. Mapping spatial distribution of particulate matter using kriging and inverse distance weighting at supersites of megacity Delhi, Sustainable Cities and Society 54: 101997.
- Thompson M, Thompson J. 2017. Introduction to ANSYS and finite element modeling, Butterworth-Heinemann, Kidlington, United Kingdom, ISBN: 0128129816.



Wilson R, Lissaman P. 1974. Applied aerodynamics of wind power of wind power machines, National Science Foundation Report.