



La erosión: un problema aerodinámico

Paula Ortega Vidals
Aldrin Y. García Juárez
Edwin Román Hernández



La erosión: un problema aerodinámico

Cómo citar este artículo: García-Juárez A, Ortega-Vidals P, Román-Hernández E. 2025. La erosión: un problema aerodinámico. Revista Ciencia y Naturaleza (1181).



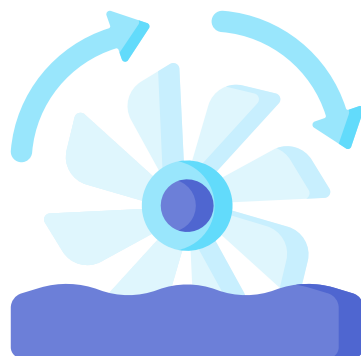
¿Cómo transformamos el viento en electricidad?

Desde la antigüedad los seres humanos hemos utilizado el recurso eólico como una fuente de energía mecánica, empleada en la navegación, así como hacer girar grandes molinos para triturar granos como el café o el maíz. Con la aparición de los motores térmicos en el siglo XIX, el uso de estas máquinas eólicas perdió fuerza.





En ese mismo siglo, se desarrolló la turbina eólica americana, que consiste en un **rotor multipala** de unos 3 metros de diámetro conectado a un mecanismo de manivela, utilizada por agricultores y ganaderos para acumular agua en depósitos, rápidamente se difundió por todo Estados Unidos.



En 1982, en Dinamarca, el profesor Latour diseñó el primer aerogenerador eléctrico (similar a los que se utilizan en los parques eólicos en la actualidad), marcando así el comienzo de la tecnología eólica como la conocemos hoy en día.



Los aerogeneradores o turbinas eólicas son máquinas que convierten la energía cinética del viento en energía eléctrica. Estos se clasifican en dos grandes grupos: los de eje vertical y los de eje horizontal, siendo estos últimos lo más utilizados en los parques eólicos debido a su diseño aerodinámico y eficiencia para el aprovechamiento del recurso eólico. Como la frase de Confucio que dice:

"Si Sirves A La Naturaleza, Ella Te Servirá A Ti."
Confucio

Los aerogeneradores están compuestos por tres elementos básicos: el rotor aerodinámico, la góndola y la torre.



El rotor aerodinámico compuesto por álabes y buje, siendo este el primer elemento en entrar en contacto con el viento, capturando la energía cinética contenida en las masas de aire y convirtiéndola en energía mecánica, la cual es transmitida mediante la **flecha del rotor** al generador eléctrico pasando por una serie de engranes que multiplican las velocidades de giro. La góndola se ubica en la parte superior que alberga los componentes principales de generación de energía, protegiéndolos de las condiciones atmosféricas adversas y asegurando su correcto funcionamiento. La torre es la estructura vertical que sostiene a la góndola y al rotor, su función principal es elevar el rotor a una altura donde los vientos sean más fuertes y transmitir todas las cargas aerodinámicas, gravitacionales, inerciales y de operación de la estructura al suelo (figura 1).

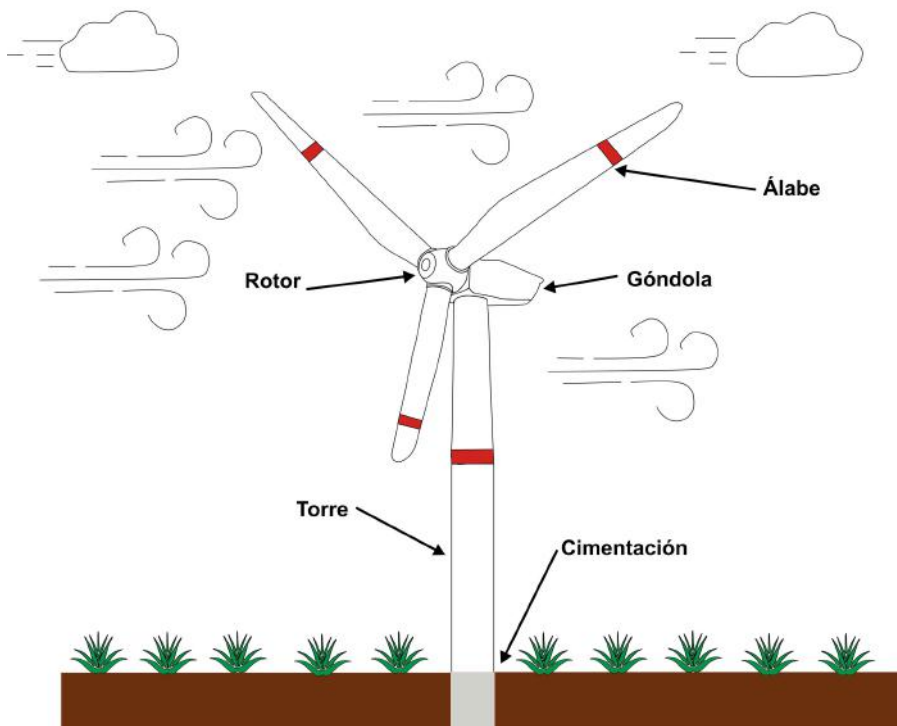


Figura 1. Componentes principales de un aerogenerador.



Conociendo los álabes

Un álabe es también conocido como pala o aspa, están contruidos por materiales resistentes y ligeros, normalmente fabricados con fibra de vidrio, fibra de carbono o madera, suelen ser solidos o huecos con uniones en el interior. El diseño aerodinámico de los álabes de aerogeneradores es similar a los que poseen los aviones, por lo que su funcionamiento es parecido.

Estos elementos están constituidos por varias secciones transversales conocidas como **perfiles aerodinámicos**, que, al moverse a través de un fluido, es capaz de generar diferencias de presiones a su alrededor. La geometría de los perfiles aerodinámicos se define como se indica en la figura 2, y están clasificados de acuerdo a: simetría, espesor, curvatura, propósitos, tipo de flujo y velocidad que experimentan a su alrededor y por familias.

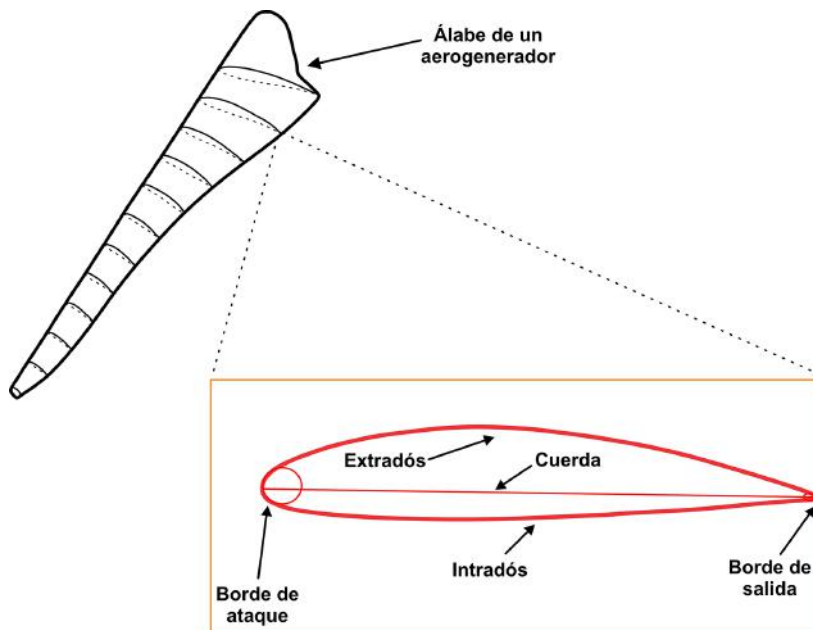
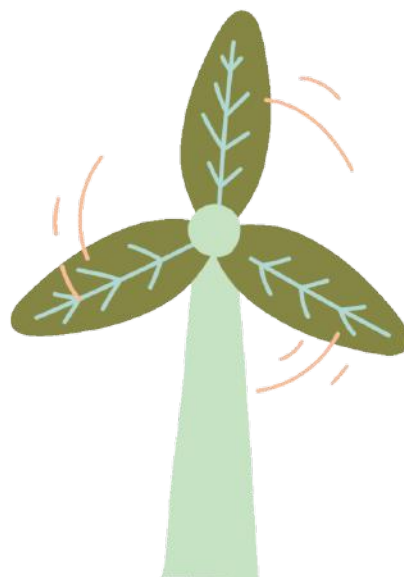


Figura 2. Geometría de un perfil aerodinámico.

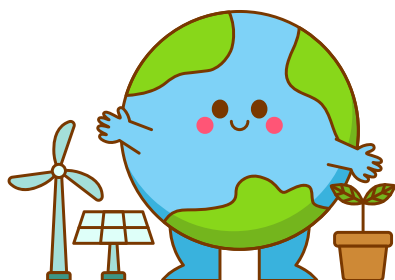


En el momento en que los aerogeneradores están en funcionamiento, el viento (masas de aire en movimiento) entra en contacto con los álabes, generando una fuerza aerodinámica que hace girar el rotor. Sin embargo, si analizamos los principios físicos que rigen este proceso, encontramos similitud a lo que sucede con los álabes de un avión.

En ambos casos, el aire que fluye sobre una superficie aerodinámica genera fuerzas que impulsan el movimiento; en los aerogeneradores, esta fuerza hace girar el rotor mientras que, en los aviones, la misma fuerza genera sustentación para mantenerla en vuelo. La principal diferencia es que los álabes de los aerogeneradores están diseñados para convertir la energía del viento en **movimiento rotacional**, mientras que los álabes de los aviones generan **sustentación** sin rotar.



Una vez que el aire fluye sobre un perfil aerodinámico, su velocidad es mayor en la parte superior (**extradós**) que en la parte inferior (**intradós**).



Esta diferencia de velocidades genera una diferencia de presiones: la presión sobre el extradós disminuye y la del intradós aumenta, lo que genera una fuerza aerodinámica resultante llamada sustentación o levantamiento.



Fuerzas que experimenta un perfil aerodinámico

Inicialmente, si las presiones en el extradós e intradós son iguales, las fuerzas generadas se anulan entre sí y no hay sustentación. Sin embargo, al aumentar el ángulo de ataque (la inclinación del perfil con respecto al flujo de aire), la presión en el extradós disminuye aún más y la del intradós aumenta, creando una fuerza neta en dirección vertical y hacia arriba. Esta fuerza de sustentación actúa en un punto específico del perfil llamado centro de presión, que es donde se puede considerar aplicada la fuerza aerodinámica resultante.

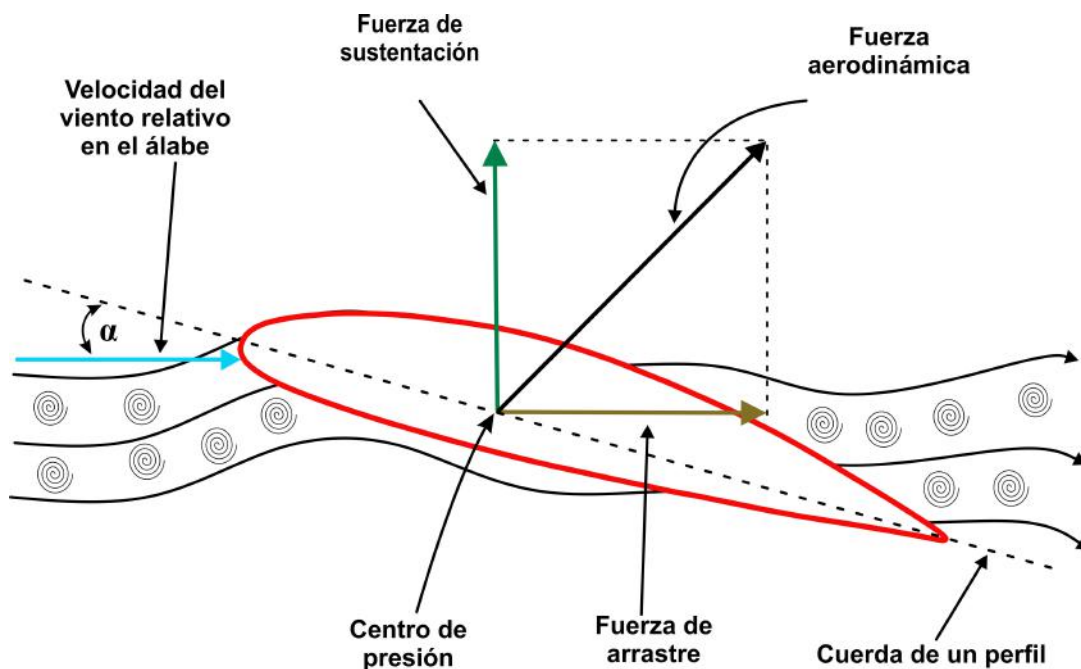


Figura 3. Componentes principales de un aerogenerador.

En la figura 3, observamos como un perfil aerodinámico se desplaza a través de un fluido como el aire, en el que experimenta dos tipos de fuerzas aerodinámicas: de arrastre y de sustentación.



La fuerza de arrastre, también conocida como resistencia aerodinámica, es la que se opone al movimiento de un perfil aerodinámico a través del fluido y actúa en la dirección opuesta al movimiento del objeto.



Para comprender este fenómeno podemos realizar el siguiente experimento: cuando el aire sopla fuertemente, sujetamos un pedazo de tabla y la alzamos con la cara de frente a la dirección del viento; podremos notar como la fuerza del viento empuja la tabla hacia la dirección predominante, como si la derribara.

La fuerza de sustentación es aquella que es perpendicular a la fuerza de arrastre, en otras palabras, es perpendicular a la dirección de flujo del aire, y es la responsable de hacer que los aviones levanten el vuelo y se mantengan en el aire.

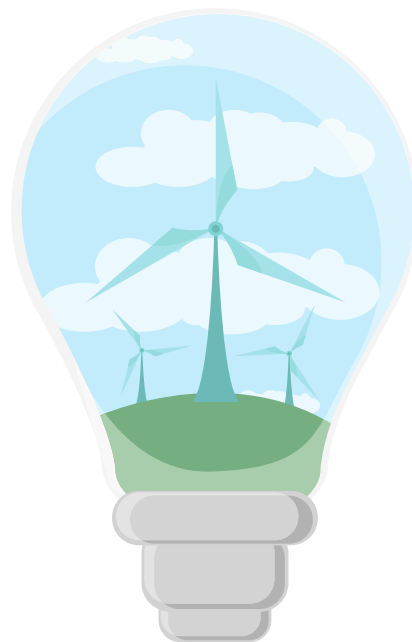
Similar cuando sostenemos una hoja de papel con ambas manos, dejando borde libre y soplamos en la parte superior de la hoja, con lo que notaremos que la hoja comienza a levantarse en vez de caer, esto es debido a que el aire en la parte superior se mueve más rápido, reduciendo la presión sobre la hoja.





De estas fuerzas se puede obtener dos parámetros **adimensionales** que nos indican como un elemento interactúa con el fluido, conocidos como coeficiente de arrastre y coeficiente de sustentación. El primero mide la resistencia aerodinámica de un objeto al desplazarse a través de un fluido, entre más pequeño sea el valor de este parámetro mejor funcionamiento tendrá el álabe, en la literatura se representa como C_D . Por otra parte, el coeficiente de sustentación, mide la capacidad que tiene un elemento de generar sustentación en relación con la presión aerodinámica y el área del elemento, representado como C_L .

Existen algunos factores que pueden afectar estas fuerzas como: la viscosidad del fluido, el tipo de flujo, la separación de la capa límite, el gradiente adverso de presión, etc. Como se mencionó, en el diseño de los perfiles aerodinámicos se pretende reducir el valor del coeficiente de arrastre y aumentar el valor del coeficiente de sustentación, ya que estos parámetros guardan una relación muy importante, pues el valor del cociente del coeficiente de sustentación entre el coeficiente de arrastre da origen a la eficiencia aerodinámica.

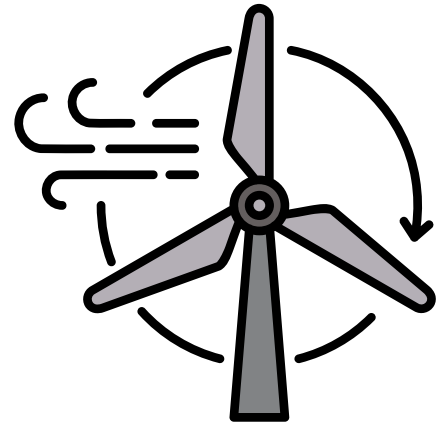


Cuanto mayor sea esta relación, más eficiente es el perfil aerodinámico, aunque de igual forma, esta relación se ve afectada por algunos factores como: el ángulo de ataque, la forma del perfil y el **número de Reynolds**.



Hablemos de la erosión

Los álabes de un aerogenerador son elementos expuestos a condiciones ambientales adversas, lo que los hace susceptibles a daños estructurales provocados por factores climáticos extremos y la interacción con partículas que se desplazan a través de las masas de aire. Estas afectaciones pueden comprometer su integridad y rendimiento aerodinámico, este fenómeno se conoce como erosión.



Este desgaste progresivo puede alterar significativamente la geometría y el perfil aerodinámico del álabe, lo que conduce a una disminución en su eficiencia operativa. Se manifiesta principalmente en

el borde de ataque, esta zona es la primera en entrar en contacto con el flujo de aire y, por lo tanto, está más expuesta al impacto de partículas en movimiento como se observa en la figura 4.

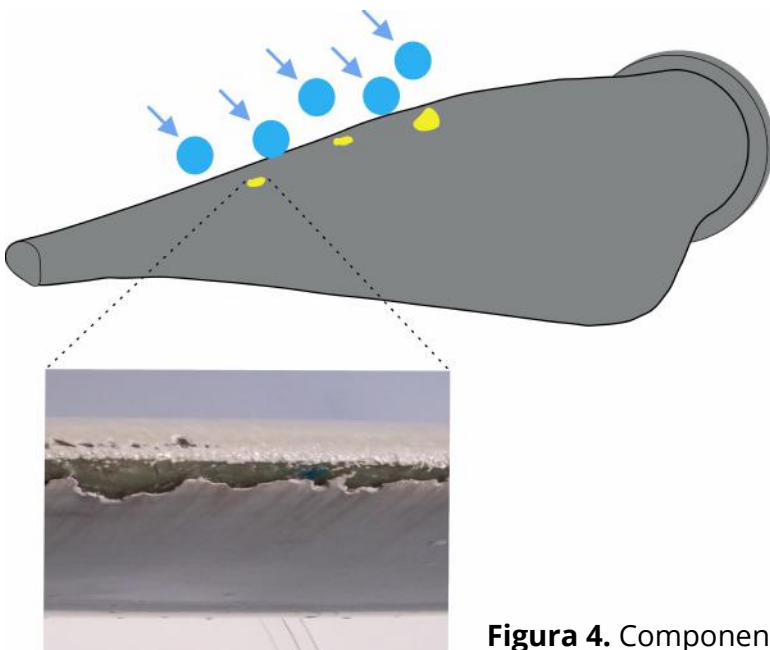
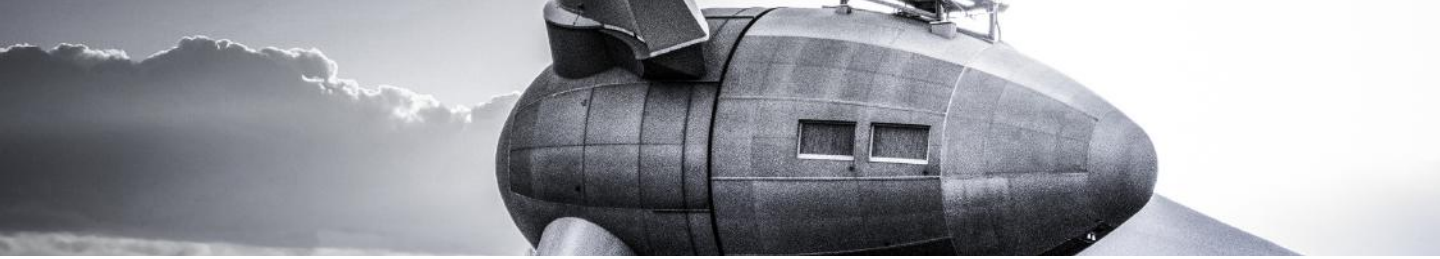


Figura 4. Componentes principales de un aerogenerador.

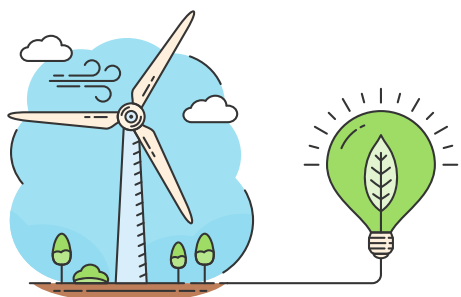


Factores como: el impacto con insectos, polvo, granizo y gotas de lluvia contribuyen a la formación de pequeños agujeros en la superficie, las cuales, si no se detectan y reparan a tiempo, pueden expandirse progresivamente en tamaño y profundidad. Además, la erosión puede generar turbulencias no deseadas y aumentar el coeficiente de arrastre del álabe, así como su desempeño aerodinámico, inclusive la seguridad estructural a largo plazo.



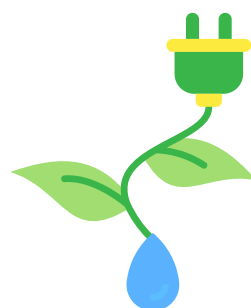
La erosión acumulativa deteriora progresivamente la geometría del borde de ataque, generando rugosidades superficiales e irregularidades que alteran el comportamiento del **flujo laminar**, lo que conlleva a una transición inapropiada a **flujo turbulento**. Como consecuencia, se produce un aumento en la fuerza de arrastre y una disminución en la fuerza de sustentación, factores clave para el rendimiento aerodinámico de los álabes.

También, hay un aumento en la fuerza de momento lo que significa que hay un mayor esfuerzo torsional y deflexión en su estructura, que puede generar fatiga acelerada del material, grietas estructurales, desalineación del rotor y fallos en los componentes internos del buje o en el **sistema pitch**.



Según estudios realizados por la empresa LM Wind Power y otros fabricantes líderes, la erosión en el borde de ataque puede reducir la producción anual de energía entre un 5% y un 20%, dependiendo de la severidad del daño y las condiciones operativas.

Este impacto se traduce en importantes pérdidas económicas, ya que la disminución de la producción energética implica menores ingresos por generación eléctrica, además de un incremento en los costos de mantenimiento correctivo y preventivo.



En casos graves, el daño por erosión puede requerir la sustitución parcial o total de los álabes, lo cual representa una inversión considerable; por ejemplo, el costo de reemplazo de un solo álabes de un aerogenerador de gran escala puede superar los \$100,000 USD.

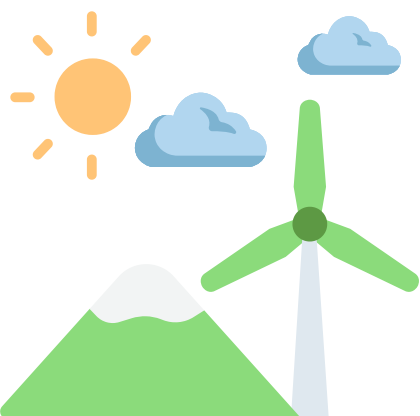
Además, los periodos de inactividad necesarios para efectuar reparaciones o reemplazos afectan negativamente la disponibilidad del aerogenerador, disminuyendo aún más su rendimiento anual. En conjunto, estos factores hacen de la erosión del borde de ataque uno de los principales desafíos técnicos y económicos para la industria de la energía eólica moderna.



Actualmente, existen diversos estudios que han sido desarrollados con el objetivo de analizar los efectos de la erosión y otros desgastes en la eficiencia aerodinámica de los álabes, buscan proponer soluciones efectivas, como el desarrollo de materiales más resistentes, recubrimientos protectores y estrategias de mantenimiento predictivo para prolongar la vida útil de los aerogeneradores y optimizar su desempeño energético.

Alternativas de solución

A pesar de que los álabes son fabricados con materiales resistentes y recubiertas con múltiples capas de protección, incluyendo pinturas especiales diseñadas para soportar agentes climáticos agresivos, existe una región particularmente vulnerable: el borde de ataque. Esta área sufre un desgaste significativo a lo largo del tiempo. Una estrategia ampliamente utilizada para prevenir el deterioro acelerado de los álabes es la aplicación de recubrimientos protectores. Estos recubrimientos actúan como una barrera física entre el material del álabe y los agentes externos dañinos, funcionando como una capa impermeable.

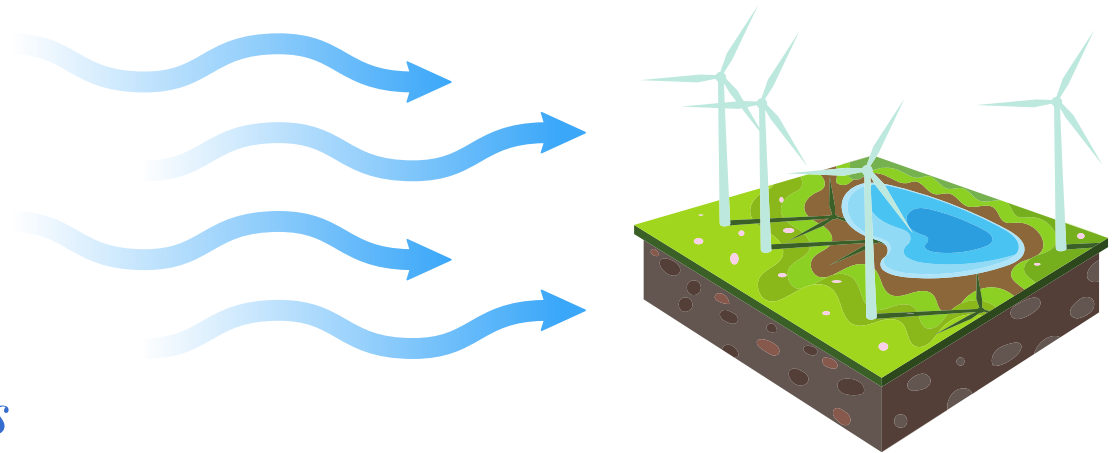


Dependiendo del fabricante o la tecnología aplicada, estos recubrimientos pueden consistir en pinturas especializadas, cintas adhesivas de alta resistencia o incluso películas poliméricas con propiedades autoadhesivas.



El objetivo fundamental es aislar la superficie expuesta de los efectos corrosivos y abrasivos del ambiente, prolongando la vida útil de los componentes y mejorando el rendimiento general del sistema eólico.

Hoy en día, algunas tecnologías incluyen recubrimientos con propiedades hidrofóbicas, resistencia UV y adaptabilidad mecánica para acompañar la deformación natural del álabes durante su operación. En este contexto, la prevención del daño por erosión no solo se convierte en una medida de protección, sino en una estrategia clave para garantizar la viabilidad económica y técnica de los parques eólicos a largo plazo.



Análisis

En el Instituto de Estudios de la Energía en la Universidad del Istmo se lleva a cabo el análisis de perfiles aerodinámicos erosionados con el propósito de determinar su eficiencia aerodinámica y comprender como este fenómeno influye en su desempeño. Para llevar a cabo esta investigación, se emplea el software ANSYS (versión estudiantil), el cual es empleado para simular la dinámica de fluidos computacionales.





En la figura 5, se observa un álabes con una erosión de 1 milímetro de profundidad en el borde de ataque, cuya sección transversal corresponde al perfil aerodinámico NACA 2412. Esta pertenece a la familia de perfiles A 18, que había estado en operación durante un periodo de 2 años a una altura de 20 de metros con una velocidad promedio de 8 m/s, instalado en un aerogenerador de 1 kw ubicado en el Centro Comunitario Ejidal La Venta Oaxaca.



Figura 5. Álabes con erosión de 1 milímetro de profundidad.

Mediante **CFD** se determinan sus parámetros aerodinámicos (coeficiente de arrastre y coeficiente de sustentación), así como su eficiencia aerodinámica. En base a los efectos causados por las condiciones climáticas en el Istmo de Tehuantepec, fue necesario indagar acerca de las velocidades promedios en la zona. De acuerdo al atlas de recurso eólico de Oaxaca y los datos obtenidos de la estación meteorológica del CERTE, la velocidad promedio es de 8 m/s.

Este valor es utilizado como parámetro de entrada para llevar a cabo la simulación, que este ligado al número de Reynolds al cual esta sometido un aerogenerador de baja potencia en operación, 500,000 y una variación de ángulo de 0° a 20° con incrementos de 2° . Los datos obtenidos se muestran en la tabla 1.



Se observa que la eficiencia aerodinámica decae conforme aumenta el ángulo de ataque debido al aumento del coeficiente de arrastre. Es necesario recordar que estos datos interpretan las consecuencias aerodinámicas que genera una erosión de primer grado (1 mm), ya que, si aumenta la profundidad de la erosión y este abarca mayor área, ocurrirá una pérdida de eficiencia mayor, lo que se traduce como una pérdida en la producción energética del aerogenerador.

Tabla 1. Valores de los coeficientes aerodinámicos.

Ángulo	C_l	C_d	C_l / C_d
0	0.069874	0.034828	2.006259
2	0.530820	0.405593	1.308752
4	0.819980	0.670322	1.223263
6	1.106630	0.945908	1.169913
8	1.492200	1.241496	1.201937
10	1.655930	1.436922	1.152415
12	1.878280	1.647310	1.140210
14	2.029030	1.785770	1.136221
16	2.189910	1.894940	1.155662
18	2.484145	1.985380	1.251219
20	2.415950	2.061639	1.171859



De aquí la importancia de llevar a cabo los mantenimientos preventivos y correctivos de los álabes, así mismo de implementar el uso de materiales resistentes y ligeros, como la fibra de carbono, para la fabricación de estos elementos que son esenciales para el funcionamiento de todo el sistema.

De igual forma, implementar recubrimientos protectores en la zona del borde de ataque de los álabes y la supervisión constante y detallada de las condiciones en las que se encuentra la estructura en cada operación. Al realizar esto, podemos disminuir notablemente las consecuencias de los efectos de la erosión e incluso contrarrestar en si la aparición de este fenómeno. 🍀



Agradecimientos

A la Universidad del Istmo por prestar las instalaciones. A la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación, por su apoyo económico en la Maestría en Ciencias en Energía Eólica con CVU 1324036.

Conceptos

Rotor multipala: Aerogenerador con un número elevado de álabes (por lo general más de 10), diseñadas para operar con viento de baja velocidad y generar un mayor torque a bajas revoluciones.

Flecha del rotor: Es un eje mecánico que transmite el par de torsión generado por el viento al hacer girar las palas del aerogenerador hacia el sistema generador eléctrico.

Cargas aerodinámicas: Son las fuerzas generadas por la interacción entre el aire en movimiento y una superficie sólida.

Cargas gravitacionales: Son las fuerzas que actúan sobre los componentes de una estructura debido a la atracción gravitatoria de la Tierra.

Cargas inerciales: Son las fuerzas que se generan debido a la aceleración o desaceleración de una masa en movimiento.

Perfil aerodinámico: Es la sección transversal de un elemento, que lo caracteriza al moverse en un fluido.

Movimiento rotacional: Rotación de un objeto alrededor de eje.

Sustentación: Es una fuerza aerodinámica que experimenta un objeto al desplazarse a través de un flujo de aire y que es perpendicular a la dirección del flujo.

Extradós: Parte superior del perfil aerodinámico, generalmente asociada a la cara de succión.

Intradós: Parte inferior del perfil aerodinámico, generalmente asociada a la cara de presión.



Centro de presión: Es el punto en donde se obtiene la fuerza aerodinámica resultante, el cual cambia de posición respecto al ángulo de ataque.

Adimensional: Término para algo que no tiene dimensiones.

Numero de Reynolds: Es un término adimensional, que relaciona las fuerzas inerciales y viscosas dentro de un fluido, que indica la naturaleza laminar o turbulenta de un flujo.

Sistema pitch: Permite regular la potencia de la instalación mediante la posición de las palas del rotor respecto al viento.

Flujo laminar: Tipo de movimiento de fluidos en el que las partículas se mueven en capas paralelas, sin mezclarse, lo que resulta en un flujo ordenado y suave.

Flujo turbulento: Es un tipo de movimiento de fluidos caracterizado por fluctuaciones caóticas en la velocidad y la presión, con partículas que se mueven de manera desordenada.

CFD: Computational Fluid Dynamics, técnica que utilizan las computadoras para simular y predecir el comportamiento de fluidos (líquidos y gases).

Para Consulta

- Prieto R, Paquette J, Mishnaevsky L. 2023. Erosion of Wind Turbine Blades. IEA Wind Task 11. [\[Link\]](#)
- Mishnaevsky L. 2021. Leading edge erosion of wind turbine blades: Mechanisms, modeling and prevention. Wind Watch Technical Papers. [\[Link\]](#)
- Yang Y, Zhao H, Yang C, *et al.* 2024. Preparation of protective coatings for the leading edge of wind turbine blades. Vacuum 221: 113352. [\[Link\]](#)
- Mishnaevsky L, Thomsen OT. 2023. Recent developments in the protection of wind turbine blades against erosion. Renewable Energy 216:1101–1115. [\[Link\]](#)



- Ramírez Ruiz DA. 2023. Síntesis y aplicación de un recubrimiento híbrido para reducir la erosión en palas de generadores eólicos Instituto Tecnológico de Pachuca. [\[Link\]](#)
- Rodríguez-Peña JM, Rodríguez-Vargas CA. 2021. Erosión en perfiles de una turbina eólica de eje vertical. EIEI: Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ingeniería 3(1): 28-37. [\[Link\]](#)

Crédito de imágenes en orden de aparición: Mikel Martinez (Osaba), Angelica Reyn (Pexels, PX), NanoStockk (Getty Images, GI), Flaticon, VectorMine, Flickr (PX), nwbob (Getty Images Signature, GIS), imaginima (GIS), Kiarra, Studio MOARA, Артём Мякинник (PX), Tookapic (PX), ivandesign, Zhaka-Boss (GI), gunnar3000 (GI), DAPA images, Photocreo, rusmaniah, deepblue4you (GIS), RS Studio (Really Simple Studio), tostphoto (GIS), PixMarket, Kise1ki (Kiseki Creative), Rantaustudio, sergioboccardo (GI), pompamicons, vencavolrab (GI), Igor, Bettermind Graphic, hudiemm (GIS), welcomia, emilio100 (GI), basari studio, Jantiko (ג'אנטיקו קריאייטיב), Rantaustudio, CreativeNature_nl (GI), schwartstock (GI), Holger Schué (PX). Crédito de figuras: Proporcionada por los autores. Los autores declaran que ningún párrafo ha sido generado completamente o con más del 50% de sus palabras con herramientas AI.

Dr. David A. Paz García
Editor en Jefe Revista CyN

Diseño: Irlanda Edith Garcia Corona



Aldrin Yohel García Juárez

Licenciado en Matemáticas Aplicadas por la Universidad del Istmo
Actualmente estudiante de la Maestría en Ciencias en Energía Eólica por la Universidad del Istmo Campus Tehuantepec.
contacto: yoheljuarez@yahoo.com



Paula Ortega Vidals

Universidad del Istmo, Profesor Investigador (Estancia Posdoctoral)
Investigación en el área de óptica particularmente óptica geométrica, actualmente con aplicación en las energías renovables específicamente en el análisis de álabes de aerogeneradores.
contacto: paulaov.29@gmail.com



Edwin Román Hernández

Universidad del Istmo, Profesor Investigador Titular B
Investigador en el área de Óptica Aplicada a las Energías Renovables, co-responsable del Laboratorio de Óptica Aplicada en la Universidad del Istmo. **contacto:** rohe_00@hotmail.com