



OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE LOS COEFICIENTES DE SUSTENTACIÓN Y ARRASTRE DE PERFILES AERODINÁMICOS PARA SU APLICACIÓN EN TURBINAS EÓLICAS

Hermínsul Rosero Cuastumal^[*], Sandra Velarde Suarez^[**]

[*] Alumno; [**] Tutor(es)

██████████@uniovi.es ^[*]

██████████@uniovi.es ^[**]

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

La optimización aerodinámica se ha convertido en un tema de alta importancia para aumentar generación eléctrica a partir del viento y por lo cual es de interés poder determinar la mejor geometría para una configuración aerodinámica según el lugar de instalación y con ciertas restricciones de diseño. El rendimiento aerodinámico normalmente se calcula a partir de una forma geométrica preestablecida y que a menudo posteriormente se optimiza en un método de ensayo y error.

El presente artículo, se realizó una revisión bibliográfica en la literatura científica respecto a la obtención experimental y/o analítica para la determinación de los coeficientes de sustentación y arrastre de perfiles aerodinámicos para su aplicación en turbinas eólicas.

Esta revisión resume los esfuerzos recientes de investigación experimental, computacional y teórica de los artículos analizados y que han contribuido a nuestra comprensión para el diseño y optimización de los perfiles aerodinámicos de HAWT y VAWT.

ABSTRACT

Aerodynamic optimization has become a matter of high importance to increase electrical generation from the wind and it is therefore of interest to be able to determine the best geometry for an aerodynamic configuration according to the installation site and with certain design restrictions. Aerodynamic performance is normally calculated from a preset geometric shape and is often subsequently optimized in a trial and error method.

This article carried out a bibliographic review of the scientific literature regarding the experimental and / or analytical obtaining for the determination of the coefficients of lift and drag of aerodynamic profiles for its application in wind turbines.

This review summarizes the recent experimental, computational and theoretical research efforts of the articles analyzed and which have contributed to our understanding for the design and optimization of the aerodynamic profiles of HAWT and VAWT.

1 INTRODUCCIÓN

La investigación y el desarrollo de tecnología capaz de aprovechar eficientemente los recursos renovables han experimentado un importante crecimiento en las últimas décadas. Estos avances vienen motivados por una serie de factores, entre los que destacan las políticas gubernamentales inmediatas para disminuir el calentamiento global, las consecuencias medioambientales y la necesidad de disminuir el consumo y dependencia de los combustibles fósiles.

El aprovechamiento de la energía eólica en la actualidad se destaca frente al resto de las energías renovables por su nivel de desarrollo, por la simplicidad de los equipos requeridos, por ser una fuente limpia e inagotable, además de presentar una de la mejor relación costo y beneficios lo cual la hace una tecnología viable para implementar.

Aunque se ha avanzado en el aprovechamiento del viento como una fuente de energía, aún quedan muchas líneas de investigación para determinar en su totalidad el comportamiento del viento y su interacción principalmente con el rotor de una turbina eólica.



Estudios relacionados con el desempeño de las HAWT y VAWT y su correspondencia en la determinación de los materiales, las geometrías, el desarrollo de modelos matemáticos y las técnicas aplicables es una tarea que seguirá ocupando a los investigadores para la optimización en los diseños de los dispositivos aerodinámicos.

En el desarrollo de perfiles aerodinámicos para aplicación de turbinas de viento el valor numérico de los coeficientes sustentación y arrastre son fundamentales para el diseño, por lo cual nuestro artículo estará enfocado en la revisión bibliográfica de tema y lo publicado en el último quinquenio en la literatura científica de técnicas y modelos de turbulencia aplicables ya sean por una metodología analítica y/o de forma experimental.

Finalmente se presenta un panorama sobre las técnicas que se han aplicado avanzado conclusiones relevantes y de igual manera se destaca qué aspectos están todavía pendiente por investigar y que tiene potencial de desarrollo para el tema objetivo de este documento.

2 MÉTODO DE ANALISIS

El desarrollo del presente trabajo ha seguido una serie de pasos y definiciones para la realización de la búsqueda bibliográfica y que se aplicaron como método de trabajo, las cuales se enuncian a continuación:

- Tipo de Acceso: Documento Abierto.
- Periodo de búsqueda: últimos ocho (8) años (2012-2019).
- Palabras Clave: Coeficiente de sustentación, coeficiente de arrastre, perfiles aerodinámicos, turbinas de eólicas, túnel de viento.
- Recursos: Bases de datos empleados para el análisis bibliográfico, principalmente Web of Science, Scopus, Google Scholar.
- Búsqueda y análisis de artículos científicos de las revistas de ciencia y tecnología de procedencia local e internacionales en bases de datos disponibles por la universidad de Oviedo.
- Búsqueda y análisis de documentos tipo tesis doctorales y/o de maestría publicadas de

universidades a nivel local (España) e internacional.

- Determinar para cada publicación científica, sus objetivos, la metodología empleada y los resultados encontrados.

3 RESULTADOS

De los resultados de los motores de búsqueda en las bases de datos se seleccionaron los artículos que están ligados al tema de investigación de este documento y que aportan directa o indirectamente sus resultados al objetivo de la determinación de los coeficientes de sustentación y arrastre de un perfil aerodinámico para aplicación en turbinas eólicas. Los resultados son:

Periodo	2016-2019
# Artículos	20 [1 - 20]

A continuación se hace un análisis grafico de los datos correspondientes según cada artículo analizado y su valor porcentual en la población para los siguientes criterios: a) Tipo de turbina que aplica la investigación, b) Método, c) teoría utilizada, d) procedencia de la investigación.

a) APLICACIONES WT

DAWT	1	5%	[2]
LWT	1	5%	[10]
VAWT	5	25%	[3],[4],[7],[11],[19]
HAWT	13	65%	[1],[5],[6],[8],[9],[12],[13],[14],[15],[16],[17],[18],[20]

Distribución Tipo Turbina que Aplica los Artículos

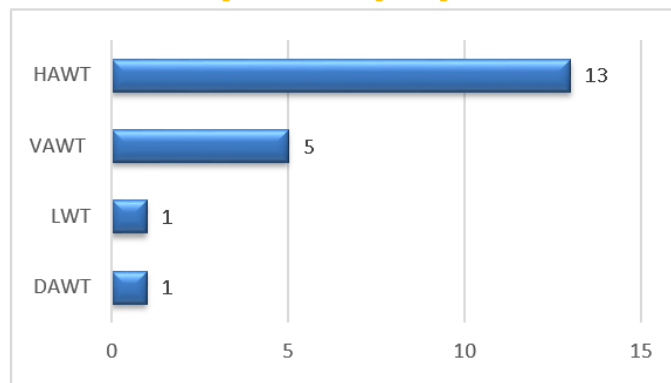


Figura 1 - Distribución según Tipo de turbina



b) METODOS APLICADOS

Analítico	12	60%	[1][2][3][4][6][10][11][13][14][15][16],[18]
Analítico/Exp.	4	20%	[5],[7],[9],[20]
Experimental	3	15%	[8],[17],[19]
Bibliográfico	1	5%	[12]

DISTRIBUCION DE METODOS DE INVESTIGACION EN ARTICULOS ANALIZADOS

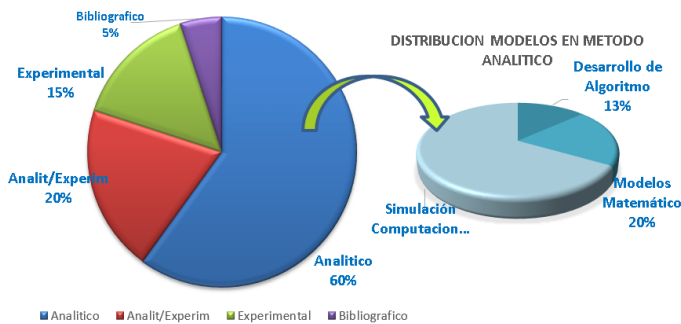


Figura 2- Distribución según Método de Investigación.

c) TEORIA APLICADA

Teoría de Turbulencia - Ec RANS	10	50%	[1][3][4][7][9][11][12],[13],[15],[20]
Teoría del elemento Pala (BET)	4	20%	[2],[5],[8],[19]
Momento de elem cuchilla (BEM)	3	15%	[14],[16],[17]
Modelos Matemáticos -Algoritmo	2	10%	[10],[18]
Análisis por elementos finitos	1	5%	[6]

DISTRIBUCION DE TEORIA APLICADA EN ARTICULOS ANALIZADOS

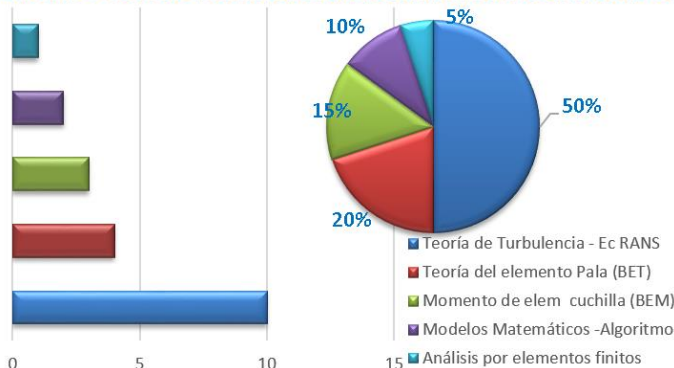


Figura 3 - Distribución según Teoría Aplicada

d) PROCEDENCIA DEL ARTICULO

Canadá	2	10%	[1],[2]
USA	2	10%	[3],[16]
Egipto	1	5%	[4]
China	7	35%	[5][10][11][13][17][18][20]
Corea	1	5%	[6]
Japón	3	15%	[7],[8],[19]
Taiwán	1	5%	[9]
Suiza	1	5%	[12]
India	1	5%	[14]
UK	1	5%	[15]

UBICACIÓN DISTRIBUCIO POR CONTINENTES

África	1	5%	[4]
Europa	2	10%	[12],[15]
América	4	20%	[1],[2],[3],[16]
Asia	13	65%	[5],[10],[11],[13],[17],[18][20][7][8][19][6][9][14]



Figura 4 - Distribución Global de las publicaciones revisadas.

Para cada una de las publicaciones científicas seleccionadas, se presenta una síntesis del artículo en el que se incluye los objetivos, la metodología aplicada y los resultados obtenidos.

A. AERODYNAMIC PERFORMANCE ANALYSIS OF SLOTTED AIRFOILS FOR APPLICATION TO WIND TURBINE BLADES, 2016. [1]

Objetivo: En este artículo se explora el mejoramiento de las características aerodinámicas de las palas de turbinas eólicas en condiciones de pérdida mediante el control pasivo de la capa límite aplicándole ranuras en su superficie.

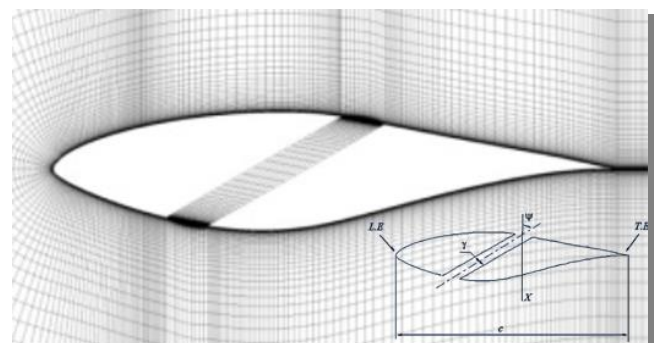


Ilustración 1 – Mallado del Perfil aerodinámico con ranura

Metodología: Se realizó un estudio numérico en 2D para analizar los efectos de la ubicación, el ancho y la pendiente de la ranura y se determinó



la mejor configuración. Las simulaciones se realizaron utilizando ecuaciones RANS; el modelo de cierre de turbulencia se ha elegido entre cuatro opciones posibles ($k-\epsilon$ Standard, Spalart-Allmaras, $k-\omega$ y $k-\omega$ SST) con base a la comparación con los resultados experimentales.

El software ANSYS-FLUENT se utiliza para la simulación.

Resultados: El análisis muestra que la presencia de ranuras no siempre conduce a una mejora de las prestaciones aerodinámicas que se ven afectadas por su posición.

Los resultados muestran que el sistema de control mejora el rendimiento aerodinámico solo en un rango específico de ángulos de ataque. Sin embargo, se observa una penalización significativa en la eficiencia de la superficie de sustentación para la configuración final. Esta penalización resulta por un incremento de la resistencia en la superficie de base para ángulos de ataque bajos.

El aumento del coeficiente de sustentación (C_L) y la disminución del coeficiente de arrastre (C_D) está directamente relacionado con la posición de la ranura en relación con el punto de separación de la capa límite. También los resultados muestran que el uso por separado de las fuerzas de sustentación y arrastre para determinar la mejor ubicación de la ranura no es el método adecuado ya que su variación puede estar en direcciones opuestas con respecto a los objetivos de aumentar la elevación y disminuir la resistencia.

Para un ángulo de ataque $AoA = 16^\circ$, la relación de deslizamiento óptima es para $X = 55\%$ (solo aguas arriba del punto de separación) hasta un 5,13% en comparación con la configuración de referencia.

El valor óptimo de la relación de sustentación sobre arrastre se obtuvo cuando la ranura se encuentra justo aguas arriba del punto de separación.

Hay un valor óptimo de ancho de ranura y un aumento en este valor reducirá el rendimiento.

La eficiencia del control de flujo se ve afectada principalmente por la velocidad del flujo y menos por el flujo másico correspondiente.

La eficiencia aerodinámica alcanza su valor máximo cuando la pendiente de la ranura es poco inclinada.

B. AERODYNAMIC OPTIMIZATION OF THE BLADES OF DIFFUSER-AUGMENTED WIND TURBINES. 2016 [2].

Objetivo: Este artículo presenta un nuevo enfoque para la aplicación en turbinas eólica horizontal, incluyéndole un difusor para la optimización aerodinámica del perfil. Se basa en una extensión de la teoría de elementos de cuchillas (BET) (aplicado al difusor) y un modelo simple para la eficiencia del difusor.

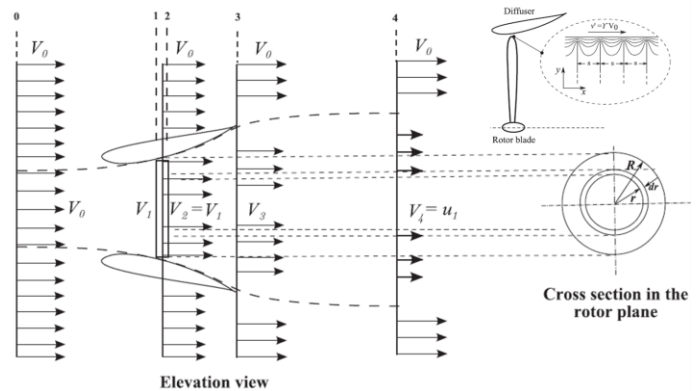


Ilustración 2- Ilustración simplificada de las velocidades en el plano del rotor y en la estela. El rotor se encuentra entre las estaciones 1 y 2 y está rodeado por el difusor.

Metodología: Se propone un procedimiento de optimización para diseñar palas de turbina eólica envueltas (difusor). El procedimiento se basa en la oportunidad del aprovechamiento de la relación de aceleración que genera el difusor para un aumento de la velocidad del aire en el plano del rotor.

Se desarrolló e implementó un algoritmo para optimizar las distribuciones de la cuerda de las cuchillas y los ángulos de torsión en presencia de un difusor, aplicando la teoría del momento axial con difusor (La teoría del momento simple considera el aire sin fricción e ignora el componente de velocidad de rotación).

Para evaluar el enfoque propuesto, se realizaron comparaciones con la optimización clásica de Glauert y los resultados experimentales disponibles en la literatura.

Resultados:

El modelo tiene un bajo costo computacional y una fácil implementación numérica. Se demostró que la predicción de la potencia de salida concuerda bien con los datos experimentales.



La relación de aceleración del difusor aumenta la velocidad en el plano del rotor.

La cuerda y el ángulo de giro están optimizados para las relaciones de aceleración típicas.

El procedimiento es aplicable para cualquier relación punta-velocidad mayor que 1.

C. OPTIMIZATION OF WIND TURBINE AIRFOIL USING NONDOMINATED SORTING GENETIC ALGORITHM AND PARETO OPTIMAL FRONT, 2012 [3].

Objetivo: Mediante FLUENT, se determinan las cargas aerodinámicas para seis perfiles. Los datos de Coeficiente de elevación (CL) y Coeficiente de arrastre (CD) en un rango de ángulos de ataque entre 0 a 12° y para 3 diferentes números de Reynolds diferentes (Re = 68459, 479210 y 958422).

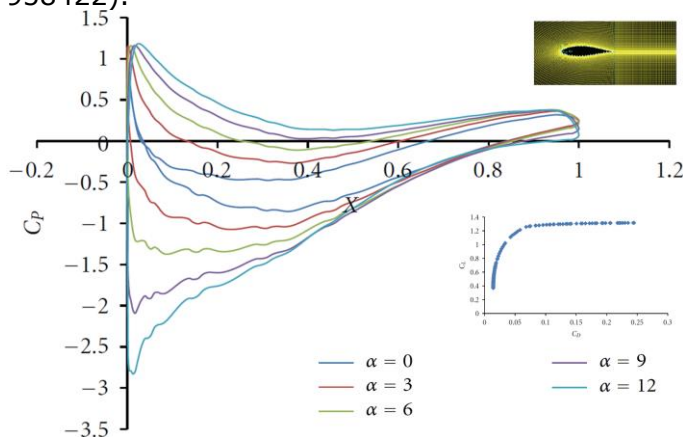


Ilustración 3 – Distribución coeficiente de potencia C_p del perfil NACA 63-421, y $Re = 68, 459$.

Metodología: Se realizó una dinámica de fluidos computacional (CFD) y una optimización del diseño multi objetivo basado en la respuesta de los esfuerzos para seis perfiles de aerodinámica 2D diferentes, y se presenta el frente óptimo de Pareto de cada superficie aerodinámica.

La metodología utilizada para generar el frente óptimo de Pareto es un evolutivo multi objetivo algoritmo (MOEA). El algoritmo específico utilizado es el "Elitista Algoritmo genético de clasificación no dominado (NSGA-II)". NSGA-II utiliza un mecanismo explícito de preservación de la diversidad. El punto de partida es la identificación de restricciones, criterios de rendimiento, variables de diseño y el rango permitido de las variables de diseño.

El software ANSYS-FLUENT se utiliza para la simulación.

El conjunto de soluciones se presenta en forma de un Pareto.

Resultados:

Cada solución óptima del Pareto representa un compromiso diferente entre los objetivos de diseño.

Esto le da al diseñador la opción de seleccionar su diseño que mejor se adapte a los requisitos de un conjunto de soluciones óptimas.

D. INNOVATIVE IMPROVEMENT OF A DRAG WIND TURBINE PERFORMANCE, 2015. [4].

Objetivo: El presente trabajo presenta un diseño novedoso de una turbina Savonius de tres rotores, los rotores dispuestos en un patrón triangular y con la misma superficie que del rotor único equivalente para comparación.

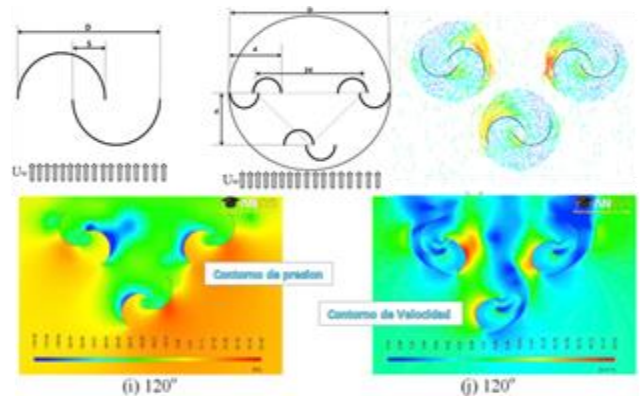


Ilustración 4- Contornos de presión y velocidad para turbina de tres rotores a $TSR \frac{1}{2} 1.0$. Izquierda: contornos de presión, derecha: contornos de velocidad.

Metodología: El rendimiento del nuevo diseño (tres rotores) y del diseño convencional (un rotor) se calculó mediante el modelado computacional del flujo alrededor de los rotores. La precisión de la solución obtenida por CFD es utilizando las ecuación RANS (modelo $k-\epsilon$ SST) y se validan los resultados comparando las simulaciones con datos experimentales disponibles en la literatura.

Resultados: Los resultados indicaron que el nuevo rendimiento del diseño tiene un coeficiente de potencia más alto en comparación con el diseño de un solo rotor.

El coeficiente de momento promedio de los tres rotores es más alto que el del rotor único para relaciones de velocidad de punta superiores a 0.6.



El coeficiente de potencia máxima de la turbina de tres rotores es 44% más alto que el del diseño de rotor único (aumento relativo).

E. AERODYNAMIC SHAPE OPTIMIZATION OF NON-STRAIGHT SMALL WIND TURBINE BLADES, 2016 [5]

Objetivo: En el presente estudio, la geometría de las palas de la turbina eólica se optimiza no solo en términos de distribución de la cuerda y el ángulo de giro, sino también con la línea de apilamiento tridimensional.

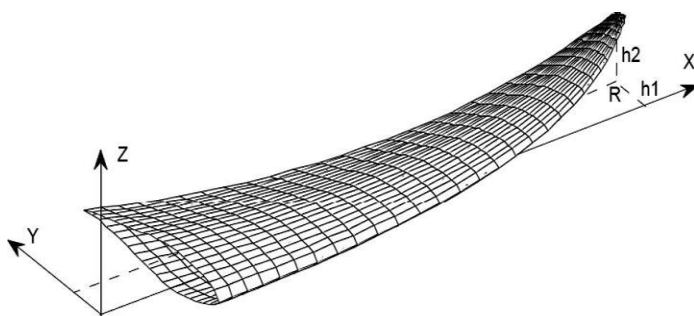


Ilustración 5- Esquema de una cuchilla curvada.

Metodología: La optimización de la geometría de las palas de la turbina eólica no recta se lleva a cabo mediante el uso de un algoritmo. El diseño de la turbina eólica está formulado como un problema de optimización de objetivos múltiples con respecto a la geometría de la pala y las condiciones de operación de la misma.

Para una distribución dada de la velocidad del viento y la velocidad del viento de corte, el objetivo final del diseño de pala de turbina eólica pequeña es obtener la máxima producción de energía anual (AEP) y la aceleración rápida a la velocidad de rotación de trabajo desde un estado estacionario a la velocidad del viento de corte.

Para mostrar la mejora de las geometrías de las palas 3D en el rendimiento aerodinámico del rotor, se optimizó una pala con solo la cuerda y el giro de la distribución (Caso 1) utilizando el mismo objetivo y luego la pala con la forma de las geometrías de la pala 3D (Caso 2) fue optimizado.

El modelo de optimización se basó en un método de elevación de la superficie con modelo de estela libre que puede tener en cuenta las palas de la turbina eólica con una línea de apilamiento 3D. El modelo fue validado contra datos experimentales obtenidos en una turbina modelo de dos palas realizada en un túnel de viento en la Universidad Tecnológica de Delft.

Las variables de diseño utilizadas en la optimización de la geometría de la cuchilla 2D fueron el ángulo de cuerda y torsión y la optimización de la cuchilla de geometría 3D fue la cuerda, el ángulo de torsión y la forma de la línea de apilamiento 3D para la forma de curva y barrido de la cuchilla.

Resultados: Para el análisis se considera el diseño de un rotor de turbina eólica de 600 W y 3 palas, con un diámetro de 1,8 m, que funcionaba a una velocidad de rotación de 650 rpm (rpm).

Los resultados muestran que las palas de la turbina eólica con una línea de apilamiento tridimensional adecuadamente diseñada aumenta la producción de energía anual (AEP) y un mejor comportamiento de arranque en comparación con las geometrías de pala optimizadas en 2 dimensiones.

Se visualiza entre el caso 1 y el caso 2 una disminución de la longitud de la cuerda en la raíz, lo que conduce a una reducción de la masa de la pala, y a su vez reduce las cargas de fatiga de los componentes principales de la turbina eólica.

F. A STUDY ON STRUCTURAL DESIGN AND ANALYSIS OF SMALL WIND TURBINE BLADE WITH NATURAL FIBRE (FLAX) COMPOSITE, 2016 [6]

Objetivo: En este trabajo, se realiza un diseño estructural en la pala de turbina eólica de eje horizontal de 1 kW que utiliza un compuesto de fibra natural de lino natural.

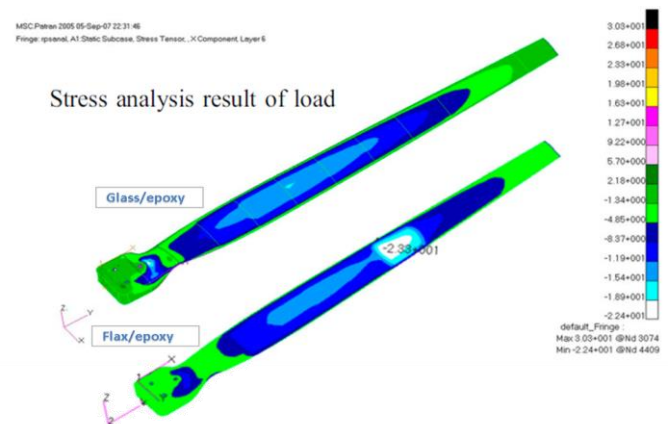


Ilustración 6 - Resultado del análisis de tensión y carga - (fibra de vidrio / epoxi) / (lino / epoxi).

Metodología: Para evaluar el diseño estructural de la cuchilla con material compuesta, se realizó mediante el método de elementos finitos.



El análisis de rendimiento de la cuchilla se realiza para investigar si la aerodinámica, el material propuesto para el diseño de la cuchilla es aceptable.

Resultados: A través de los análisis estructurales, se confirma que la cuchilla diseñada con material compuesto natural es aceptable para la seguridad estructural, la desviación de la punta de la cuchilla, la estabilidad estructural, la posibilidad de resonancia y el peso.

G. WIND TUNNEL AND NUMERICAL STUDY OF A STRAIGHT-BLADED VERTICAL AXIS WIND TURBINE IN THREE-DIMENSIONAL ANALYSIS (PART II: FOR PREDICTING FLOW FIELD AND PERFORMANCE), 2016 [7].

Objetivo: Este artículo presenta un modelo aerogenerador de eje vertical (VAWT) de hoja recta para el análisis de fuerzas aerodinámicas mediante el túnel de viento y su comparativo con el análisis CFD en 3D modelo RANS ($k-\epsilon$), para un flujo de entrada fluctuante alrededor de la superficie de la pala del rotor en la dirección transversal.

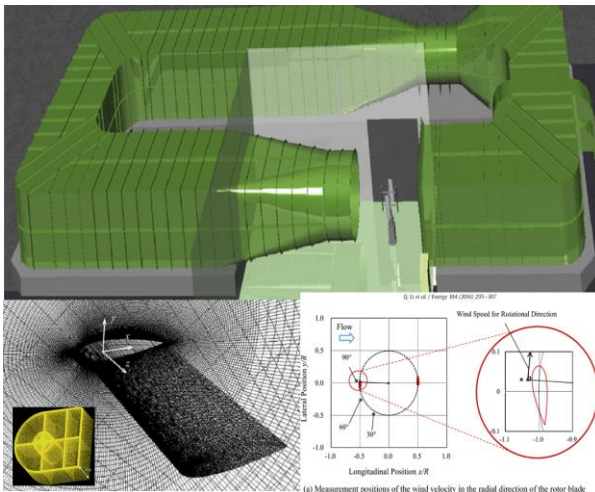


Ilustración 7- Vista panorámica del laboratorio y túnel de viento.

Metodología: Los experimentos se desarrollan en el túnel de viento utilizando medición de velocímetro laser Doppler (LDV) bidimensional para la evaluación del campo de flujo y el rendimiento energético que actúa sobre un VAWT de hoja recta y se utiliza un sistema para medir la presión que actúa sobre una sola cuchilla de VAWT en la dirección transversal.

En el análisis numérico, se han realizado modelos 3D CFD para simular las características de las fuerzas aerodinámicas de VAWT con el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ SST (transporte esfuerzo cortante). La velocidad de

rotación del rotor y el par del rotor se pueden medir con un medidor de par que está instalado en el eje del rotor de la turbina eólica.

Resultados: Al comparar los resultados de los experimentos del túnel de viento y el análisis numérico, concuerdan que se encuentra que la cantidad de impulso es mayor en la altura del centro de la cuchilla y es menor en la punta de la cuchilla.

Los resultados experimentales para la determinación del campo de flujo alrededor de VAWT de hoja recta, se pueden predecir utilizando el modelo CFD 3D basado en el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ SST.

H. EFFECT OF TURBULENT INFLOWS ON AIRFOIL PERFORMANCE FOR A HAWT AT LOW REYNOLDS NUMBERS (PART II: DYNAMIC PRESSURE MEASUREMENT), 2016 [8].

Objetivo: Se revisa la influencia de la turbulencia en las características de pérdida dinámica de la Turbina de viento de eje horizontal (HAWT) con experimentos de túnel de viento. Se diseñó un perfil aerodinámico UMY02-T01-26 que podría funcionar eficientemente con un número alto de Reynolds. Se utilizaron rejillas de turbulencia para generar el efecto para las zonas de estudio.

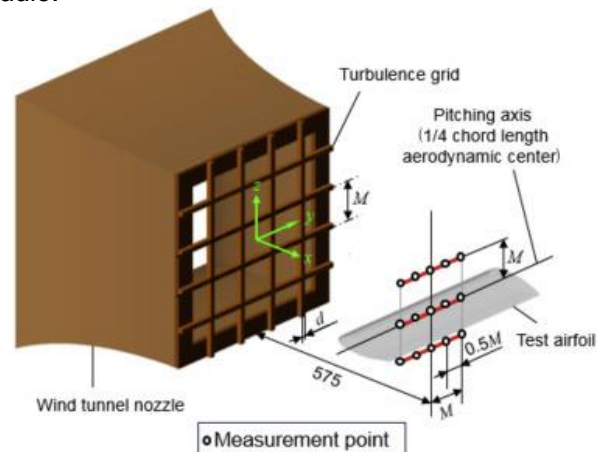


Ilustración 8 - Diagrama esquemático de la cuadrícula de turbulencia y posición de elementos de medición.

Metodología: Para resaltar la influencia de la turbulencia en el rendimiento del HAWT, se investigó el fenómeno de pérdida dinámica midiendo las presiones sobre la superficie de la cuchilla para los diferentes números de Reynolds. Los experimentos se midieron a diferentes a intensidades de turbulencia de entrada en el túnel de viento.

La entrada turbulenta fue generada por rejillas de turbulencia, en las cuales se podía controlar la intensidad. También se instalaron dispositivos de



presión multipuerto para la caracterización experimental de flujos, y presiones de superficie de la cuchilla HAWT y determinar el fenómeno de pérdida dinámica.

Resultados: La investigación experimental presentada en este documento podría ser útil para la validación del rendimiento aerodinámico HAWT.

I. OPTIMAL DESIGN OF PROTUBERANT BLADES FOR SMALL VARIABLE-SPEED HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE-EXPERIMENTS AND SIMULATIONS, 2017 [9].

Objetivo: El artículo estudia como optimizar el diseño de protuberancia de las cuchillas HAWT para que el sistema obtenga un rendimiento óptimo en rotaciones de baja velocidad, mientras que no ocurre una caída significativa del rendimiento a altas velocidades de punta. El estudio se realizó para cuchillas de rectas (sin afilar / sin retorcer) con protuberancias sinusoidales aplicadas en los bordes de ataque.

En este trabajo, las protuberancias sinusoidales se aplican solo a una parte de los bordes de ataque de las cuchillas utilizando el perfil SD8000 como base.

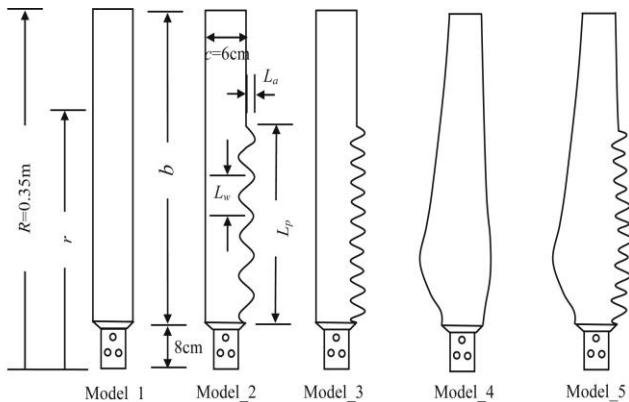


Ilustración 9- Diseño de modelos para pruebas y simulaciones.

Metodología: El objetivo del presente estudio es obtener el coeficiente de potencia máxima, para las verificaciones, se llevaron a cabo experimentos de túnel de viento para proporcionar datos comparativos; Además, también se realizaron simulaciones numéricas para visualizar aún más los campos de flujo.

Las variables de análisis son la Amplitud de onda, la longitud de onda y el porcentaje de extensión de la protuberancia.

En la prueba experimental del túnel se montó un transductor de par en el eje principal

entre la pala de la turbina y el generador para medir la salida del par mecánico y determinar el coeficiente de potencia correspondiente.

Los campos de flujo 2D / 3D se simularon resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes incompresibles en estado estacionario, junto con el modelo de turbulencia k- ω de transporte de esfuerzo cortante (SST) para todos los casos.

Resultados: Como resultado, se identifica el porcentaje de extensión de la protuberancia es el factor dominante para mejorar el rendimiento y la amplitud de onda tiene un menor efecto.

La optimización de protuberancias en el borde de ataque de las palas, aumentan el rendimiento de HAWT, pero se cumple únicamente a baja velocidad de rotación, una caída significativa del coeficiente de potencia C_p está presente bajo rotaciones de alta velocidad.

J. INTELLIGENCE ALGORITHM FOR OPTIMIZATION DESIGN OF THE LOW WIND SPEED AIRFOIL FOR WIND TURBINE, 2018 [10].

Objetivo: En el área de baja velocidad del viento (@ 6-8 m/s), se propone un nuevo algoritmo de inteligencia para aumentar el coeficiente de potencia, basado en la geometría del perfil aerodinámico expresado por spline para palas LWS.

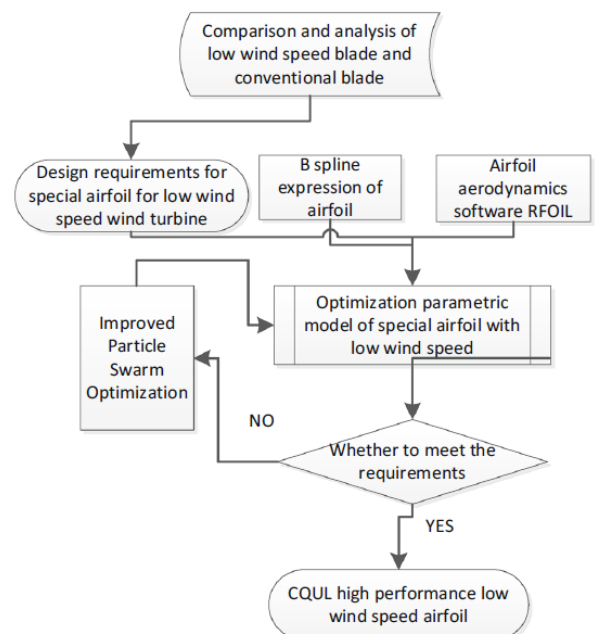


Ilustración 10- El diagrama de flujo de la técnica propuesta.



Metodología: El rendimiento aerodinámico de un nuevo perfil llamado CQUL-180, tomado como ejemplo, fue analizado y validado por la dinámica de fluidos computacional en comparación con el perfil DU96-W-180, que verifica la confiabilidad del algoritmo de inteligencia.

Resultados: El rendimiento del perfil aerodinámico de 18% de espesor mejora, el coeficiente de elevación máximo aumenta un 13.53%, y la relación máxima de elevación a arrastre aumenta en un 10.77%; bajo la condición de transición libre, el coeficiente de elevación máximo aumenta en un 18.84%, y la relación máxima de elevación aumenta 11.92%.

K. AIRFOIL OPTIMIZATION TO IMPROVE POWER PERFORMANCE OF A HIGH - SOLIDITY VERTICAL AXIS WIND TURBINE AT A MODERATE TIP SPEED RATIO, 2016 [11].

Objetivo: El objetivo principal del presente estudio es desarrollar un sistema automático de optimización de perfil aerodinámico de sustentación para mejorar el rendimiento de potencia de un VAWT.

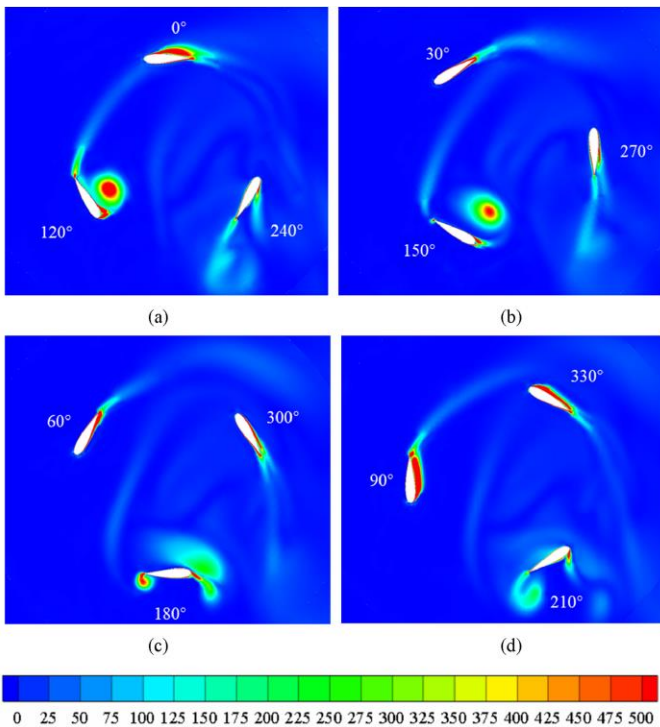


Ilustración 11 - Contornos instantáneos de magnitud de verticalidad a $TSR = 0.9$ para el VAWT con perfiles optimizados.

Metodología: Se emplea el método de simulaciones CFD acopladas con algoritmos genéticos. La optimización se realiza a una relación de velocidad de punta moderada (TSR) con un valor de 1.0, el estudio implica el trabajo de modelado numérico, verificación y validación del modelo CFD y el desarrollo del algoritmo de optimización.

Resultados: El sistema de optimización integrado utilizado en este documento proporciona una forma efectiva de generar perfiles de superficie aerodinámica adecuados para VAWT dados con el objetivo de lograr una mayor eficiencia energética.

Se establece un sistema automático de optimización de perfil de perfil aerodinámico para VAWT. El perfil aerodinámico optimizado se vuelve no simétrico con el grosor ampliado. El rendimiento de potencia del VAWT con el perfil optimizado mejora sensiblemente.

L. WIND-TURBINE AND WIND-FARM FLOWS : A REVIEW, 2019 [12]

Objetivo: Revisar las investigaciones teóricas, experimentales y computacionales recientes sobre los flujos turbulentos del aire entrante sobre las turbinas eólicas. Analizar la superposición en parques eólicos, con énfasis en las estelas de las turbinas y la capa límite turbulenta responsable de las pérdidas considerables de energía y cargas de fatiga en los parques eólicos

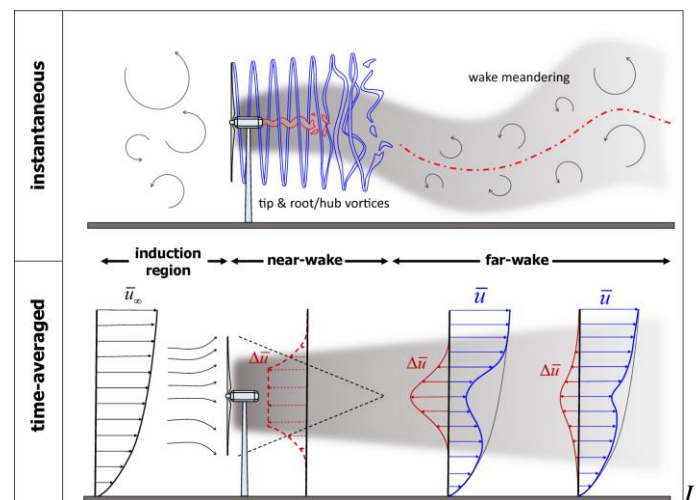


Ilustración 12- Figura esquemática que muestra las regiones de flujo resultantes de la interacción de una turbina eólica y la capa límite turbulenta entrante.



Metodología: Uno de los principales desafíos para optimizar el diseño, la operación, el control y la integración de la red de los parques eólicos es la predicción de su rendimiento, debido a las complejas interacciones bidireccionales multiescala entre los parques eólicos y la turbulenta estela generada.

El presente artículo revisa investigaciones teóricas, experimentales y computacionales recientes sobre los flujos de turbinas eólicas y parques eólicos, con énfasis en las estelas de las turbinas y su interacción con el ABL.

Estudio del comportamiento: Parametrización de parques eólicos en modelos climáticos. Efecto de los parques eólicos en la meteorología local. Efectos de estabilidad de la capa superficial. Efectos térmicos y Estratificación de atmósfera libre.

Resultados: En los parques eólicos el rendimiento energético de la turbina se ve fuertemente afectado por la dirección del viento, que cambia efectivamente la disposición del parque con respecto al viento entrante.

Se han identificado y estudiado diferentes regiones de flujo para el caso de terreno plano y homogéneo: región de inducción del parque eólico, región de desarrollo, región completamente desarrollada (donde el flujo se ajusta completamente al parque eólico) y región de estela del parque eólico.

La región cercana a la estela, cuya estructura y dinámica (por ejemplo, vórtices de punta y cubo) se ven afectadas por la geometría y el funcionamiento de la turbina eólica, tiene una longitud de aproximadamente dos a cuatro diámetros de rotor, dependiendo de la intensidad de la turbulencia.

En general se ha presentado lo relevante sobre estudios experimentales, computacionales y teóricos de las interacciones las estelas con turbinas eólicas y parques eólicos. Este conocimiento es esencial para optimizar el diseño y el control de parques eólicos.

M. AERODYNAMIC SENSITIVITY ANALYSIS FOR A WIND TURBINE AIRFOIL IN AN AIR-PARTICLE TWO-PHASE FLOW, 2019 [13].

Objetivo: Estudio del impacto de las partículas de arena en el aire y su afectación sobre

el rendimiento en una turbina eólica de eje horizontal.

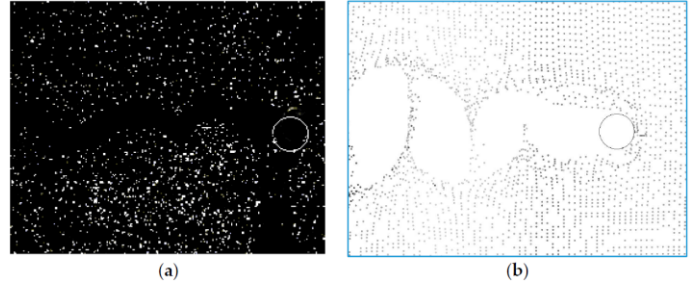


Ilustración 13- Imágenes de dispersión de partículas para número de Stokes $st=0.98$ (a) Experimental (b) computacional.

Metodología: Se describen y analizan las ecuaciones de Navier-Stokes junto con un modelo de fase discreta de Lagrangia para simular los flujos de partículas de aire sobre los perfiles NH6MW25 de una pala de turbina eólica de 6 MW y el perfil NACA0012.

Resultados: El presente estudio aclara los principios para la disminución del rendimiento de un perfil aerodinámico de una turbina eólica debido a la presencia de partículas y las conclusiones son útiles para el diseño de la turbina eólicas.

Para un perfil aerodinámico de un HAWT en un flujo de partículas de aire, la disminución de coeficiente de sustentación, el incremento de coeficiente de arrastre y la distancia de movimiento ascendente del punto de separación capa límite varían con el incremento del ángulo de ataque.

N. OPTIMIZATION OF POWER COEFFICIENT ON A HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE USING BEM THEORY, 2013 [14].

Objetivo: Se aplica la teoría del elemento pala para determinar analíticamente el valor óptimo de una turbina eólica de eje horizontal. Esta optimización de la Aero turbina se centra en el desarrollo de un algoritmo de optimización multidisciplinario para el diseño de aerogeneradores de eje horizontal con múltiples restricciones. Búsqueda de equilibrio para un Óptimo costo de energía, una Geometría óptima del rotor, unas características óptimas de la superficie de sustentación, Costo de energía



versus potencia específica., Cargas aerodinámicas y Material de la cuchilla.

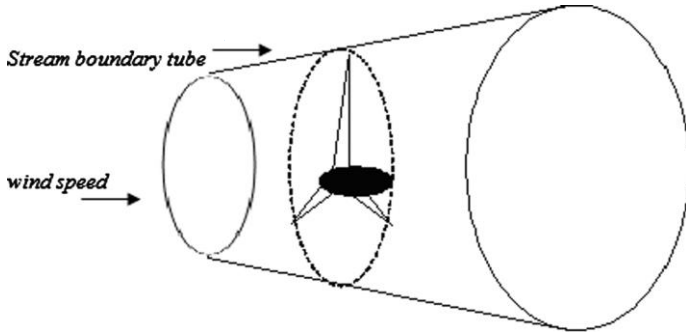


Ilustración 14 - Modelo de disco de actuador de una turbina eólica.

Metodología: En este artículo, la teoría del elemento de la cuchilla se utiliza para encontrar el valor óptimo analíticamente. El efecto del coeficiente de potencia para diferentes ángulos de cuchilla, relación de velocidad de punta, Se presenta la relación del coeficiente de arrastre y el coeficiente de elevación y la solidez de la cuchilla y se obtiene el valor de ajuste optimizado.

Para la optimización se tomaron la variación en los siguientes parámetros; el ángulo de la cuchilla (θ) varía entre 0 y 10 °; La relación de C_D/C_L se varía entre 0 y 0,10; La solidez del rotor, (σ) varía entre 0,10 y 0,30 y el TSR varía entre 2 y 14.

Resultados: Las palas de la turbina se optimizan con el objetivo de lograr el coeficiente de potencia máximo para la pala dada con solidez, relación de coeficiente de arrastre para levantar, ángulo de ataque y relación de velocidad de punta.

O. THE PHYSICAL MODELLING AND AERODYNAMICS OF TURBULENT FLOWS AROUND HORIZONTAL AXIS WIND TURBINES, 2017 [15].

Objetivo: Evaluar la confiabilidad de los modelos de turbulencia en la predicción de los campos de flujo alrededor de las palas del rotor de la turbina eólica de eje horizontal (HAWT) y también para mejorar nuestra comprensión de la aerodinámica del campo de flujo alrededor de las palas.

Model naming convention	Category	Description
Eddy-Viscosity Models (EVM) $S(k-\epsilon)$ HR	Standard $(k-\epsilon)$ High-Reynolds-number	
$(k-\epsilon)$ LHRNQ	$(k-\epsilon)$ Lien High-Reynolds-number Non-linear Quadratic	
$(k-\epsilon)$ LHRNC	$(k-\epsilon)$ Lien High-Reynolds-number Non-linear Cubic	
$R(k-\epsilon)$ HR	Realizable $(k-\epsilon)$ High-Reynolds-number	
$R(k-\epsilon)$ TL	Realizable $(k-\epsilon)$ Two-Layer	
$(k-\epsilon)$ LLR	$(k-\epsilon)$ Lien Low-Reynolds-Number	
$(k-\epsilon)$ LLRNQ	$(k-\epsilon)$ Lien Low-Reynolds-Number Non-linear Quadratic	
$(k-\epsilon)$ TLLNQ	$(k-\epsilon)$ Two-Layer Lien Non-linear Quadratic	
$SST(k-\omega)$	Shear Stress Transport SST $(k-\omega)$	
$v^2-f(k-\epsilon)$	$v^2-f(k-\epsilon)$ Low-Reynolds-number	
Reynolds stress models	RSM-GL	Reynolds Stress Model-Gibson and Launder
	RSM-SSG	Reynolds Stress Model-Speziale, Sarkar and Gatski

Ilustración 15 - Lista de modelos turbulentos investigados en el presente estudio.

Metodología: Los cálculos del flujo turbulento que pasa por el rotor de la turbina eólica se llevan a cabo utilizando el código comercial CFD STAR-CCM +. En este código, el enfoque de volumen finito se utiliza para reemplazar, a través del proceso de desratización, cada una de las ecuaciones de transporte de flujo diferencial, con un conjunto de ecuaciones algebraicas, una para cada volumen de control, que luego se pueden resolver numéricamente.

Las simulaciones se validan con los datos de los experimentos de la turbina eólica NREL / NASA Fase VI. Las simulaciones abarcan el uso de doce modelos de turbulencia. El procedimiento numérico se basa en la desratización de volumen finito de las ecuaciones 3D inestable de Navier-Stokes de Reynolds. Las simulaciones resultantes se comparan con la gama completa de datos experimentales disponibles para este caso.

Resultados: Los modelos RANS producen simulaciones cuantitativamente confiables de los flujos de turbinas eólicas y en presentar la evolución del flujo en un rango de condiciones de operación. A velocidades bajas (en relación con la velocidad de la punta de la pala), el flujo sobre las superficies de la pala permanece unido y todos los modelos RANS probados devuelven los valores correctos de los coeficientes de rendimiento clave. A velocidades de viento más altas, existe una separación de flujo circunferencial sobre la superficie de la pala a favor del viento.

P. WIND TURBINES THEORY - THE BETZ EQUATION AND OPTIMAL ROTOR TIP SPEED RATIO, 2016 [16].

Objetivo: Se presenta una derivación detallada de la "Ecuación de Betz" y el "Criterio de Betz" o "Límite de Betz", y se discuten sus sutilezas, ideas y las dificultades en su derivación y aplicación.

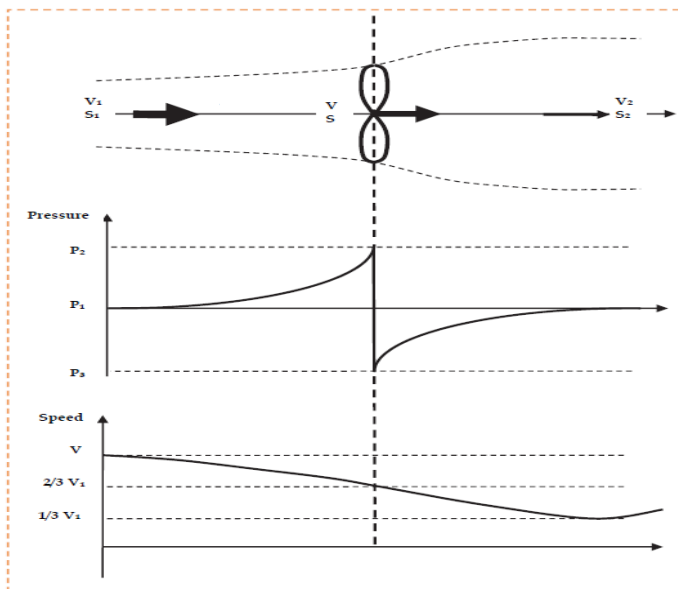


Ilustración 16 - Variación de presión y velocidad en un modelo ideal de turbina eólica.

Metodología: Se aplicó Metodología Analítica, y análisis matemático.

Resultados: Descripción detallada del límite de Betz. Aplicado a turbinas de eje horizontal y las siguientes conclusiones:

La máxima eficiencia teórica de una turbina eólica viene dada por el límite de Betz, y es de alrededor del 59%.

Las turbinas eólicas deben estar diseñadas para funcionar a su relación óptima de TSR para extraer la mayor potencia de la corriente de viento. Si la pala siguiente en el rotor llega a la estela cuando el aire todavía está turbulento por el efecto de la pala anterior, no podrá extraer energía del viento de manera eficiente, y estará sujeto a altos esfuerzos de vibración.

Q. WIND TUNNEL INVESTIGATION OF AUTOROTATION OF PLATE: THE EFFECTS OF GEOMETRY, REYNOLDS NUMBER AND ROTATION DIRECTION, 2019 [17].

Objetivo: El objetivo de esta investigación es proporcionar información sobre el efecto de la geometría y el número de Reynolds en la aerodinámica de las placas giratorias, adicionalmente analizar los efectos sobre los coeficientes de elevación y arrastre y de la velocidad de rotación.

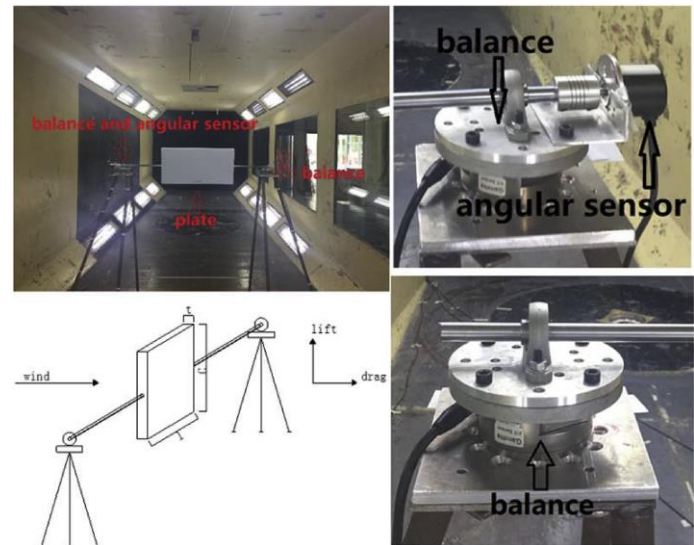


Ilustración 17- Modelo de prueba e instrumento de medición.

Metodología: Se realizó un estudio mediante pruebas en el túnel viento, con una sección de trabajo de 3 m x 2.5 m x 15 m, tenía un rango de velocidad de 0.5 m / s ~ 68 m / s, equipado con un control de velocidad automático, un sistema de control y adquisición de datos, y un sistema de plataforma giratoria automática para pruebas de modelos en estructuras de edificios. La fuerza de elevación y arrastre se midieron mediante dos balanzas de fuerza instaladas en una plataforma de soporte.

Se analizó el comportamiento y los efectos de la relación de aspecto, relación de espesor, número de Reynolds y dirección de rotación sobre la aerodinámica de la placa giratoria, coeficiente de elevación y coeficiente de arrastre.

Resultados: El coeficiente de sustentación es inversamente proporcional al Reynolds.

El coeficiente de arrastre es independiente de la relación de aspecto,

La interpretación previa del efecto del número de Reynolds sobre el coeficiente de sustentación y arrastre es inexacta.

El coeficiente de elevación se encuentra en función de la geometría, los números de Reynolds y la dirección de rotación y el coeficiente de arrastre, que fluctúa alrededor de una constante de 1.3, es independiente de dichos factores.



R. A NEW OPTIMIZATION APPROACH TO IMPROVE THE OVERALL PERFORMANCE OF THICK WIND TURBINE AIRFOILS, 2016 [18].

Objetivo: El estudio presenta una forma de mejorar la propiedad estructural de las secciones de la cuchilla mediante el uso de perfiles más gruesos para reemplazar los perfiles utilizados anteriormente, para lo cual se presentó un modelo matemático de la optimización general de indicadores de evaluación para el desempeño de las palas del rotor modernas: rango amplio de ángulo de ataque, y estabilidad con condiciones de operación variables.

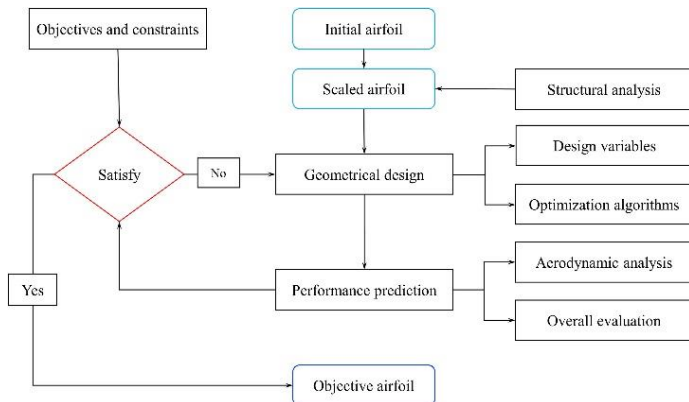


Ilustración 18 - La estrategia de diseño de la optimización del rendimiento general de la superficie de sustentación.

Metodología: Sobre la base de este modelo matemático, se estableció una plataforma de optimización integrada para el diseño general de las alas gruesas. A través de un experimento de optimización, Se obtuvo una nueva superficie aerodinámica de 35 por ciento de espesor relativo. El nuevo perfil aerodinámico se predijo con un alto coeficiente de elevación de diseño, una relación máxima aceptable de elevación a arrastre, un parámetro de pérdida moderado y parámetros de estabilidad deseables.

El diseño completo incluye varios pasos clave como los siguientes:

- 1) el conjunto de perfiles iniciales, funciones objetivas, restricciones y variables de diseño;
- 2) representar y modificar la característica geométrica del perfil utilizando las variables de diseño;
- 3) análisis numérico sobre el rendimiento de la superficie de sustentación;
- 4) evaluar el rendimiento general y juzgar si el diseño está terminado.

Resultados: Las características de elevación del nuevo perfil han sido validadas por pruebas experimentales. Estos resultados confirmaron que el método propuesto ha equilibrado efectivamente los requisitos de la sustentación y ha mejorado con éxito el rendimiento general de la nueva superficie.

S. THE INFLUENCE OF FLOW FIELD AND AERODYNAMIC FORCES ON A STRAIGHTBLADED VERTICAL AXIS WIND TURBINE, 2016 [19]

Objetivo: Para predecir las características del campo de flujo y las fuerzas aerodinámicas en VAWT de hoja recta, en el túnel de viento se investiga la evaluación del rendimiento energético diferente TSR.

Se analiza y evalúa el campo de flujo y las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre una turbina eólica de eje vertical de hoja recta (VAWT).

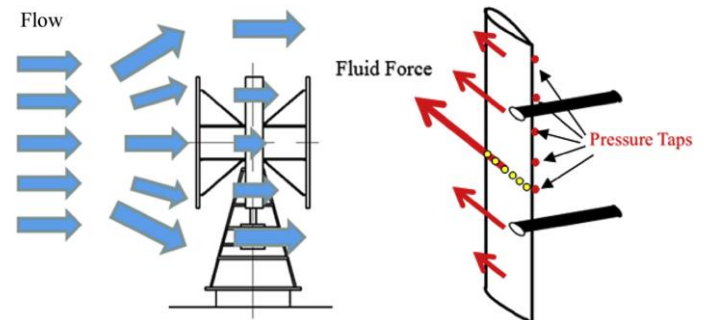


Ilustración 19- La distribución del campo de flujo alrededor de VAWT.

Metodología: mediante técnica experimental con túnel de viento, a tres Reynolds diferentes y con el uso de un sistema de medición por LDV (Velocímetro Laser - Doppler) se determinaron los flujos inestables bidimensionales alrededor del VAWT, que operan a tres relaciones de velocidad de punta diferentes. Además, para explicar las características de las fuerzas aerodinámicas, las presiones que actúan sobre la superficie de la pala se midieron durante la rotación mediante un escáner multipuerto montado en el concentrador y las señales de presión se transmitieron al sistema estacionario a través de una LAN inalámbrica.

Resultados: El método experimental aprovecha el LDV para medir la velocidad del viento en el campo de flujo a tres TSR ($\lambda = 1.38, 2.19$ y 2.58) durante la rotación.

La distribución de velocidad demostró el déficit de velocidad del viento. Mientras tanto, el ángulo



geométrico de ataque y la velocidad de flujo resultante cambian periódicamente debido a la velocidad y dirección del viento local dependiendo del ángulo acimutal. Como resultado, se aclara que las fuerzas aerodinámicas muestran los valores máximos cuando la pala atraviesa la región aguas arriba.

T. THE EFFECTS OF UNSTEADY WIND ON THE PERFORMANCES OF A NEWLY DEVELOPED CROSS-AXIS WIND TURBINE : A WIND TUNNEL STUDY, 2019 [20]

Objetivo: Se desarrolló un sistema de diseño de optimización multi-objetivo y multi-restricción para perfiles de rotor basado en el análisis de turbulencia RANS.

Se verificó el rendimiento del perfil optimizado en pruebas experimentales de túnel de viento.

La existencia de las paredes del túnel de viento mostraba una desviación en los valores de fuerzas aerodinámicas, por lo cual para corregir los datos de prueba adicionalmente este documento presenta el método de corrección del efecto de sustentación.

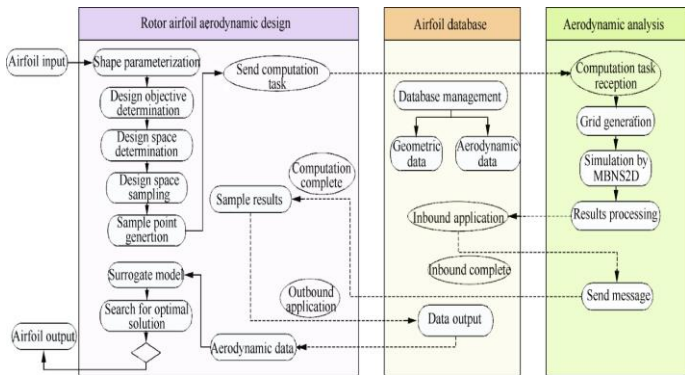


Ilustración 20 - Diagrama de flujo del diseño de optimización de la superficie aerodinámica del rotor.

Metodología: El método de optimización adoptado en este documento se basa en el algoritmo evolutivo, la idea de las soluciones óptimas de Pareto multi-objetivo y el método de la función de penalización.

En combinación con la base de la tecnología de prueba estacionaria de superficie aerodinámica de rotor de alta precisión, las superficies aerodinámicas de rotor CRA09-B y CRA09-A se probaron en el túnel de viento S3MA de alta velocidad de ONERA. Para corregir los datos aerodinámicos, se utiliza un método de presión lineal de pared de un solo parámetro para considerar los efectos del túnel.

Resultados: El método de diseño algoritmo evolutivo de optimización multi-objetivo y multi-restricción desarrollado en este estudio es confiable.

El perfil aerodinámico optimizado CRA09-B proporciona un mejor rendimiento estático que el perfil aerodinámico CRA09-A en términos de coeficiente de elevación máximo y relación de elevación a arrastre.

4 PRINCIPAL APORTE DE LOS ARTICULOS

Después de la síntesis presentada en el capítulo anterior para cada uno de las publicaciones analizadas, a continuación se resumen el aporte sustancial al tema específico de análisis de este documento.

Para una HAWT y con la inclusión de ranuras en los perfiles aerodinámicos, se encontró que existe un valor óptimo de la relación entre los coeficientes de sustentación y de arrastre. Este valor se obtuvo en la posición de la ranura cuando se encuentra justo aguas arriba del punto de separación de la capa límite. [1].

Para una HAWT se desarrolló y probó con buenos resultados un algoritmo para la optimización de las palas en presencia de un difusor. La optimización consiste en mejorar las distribuciones de la cuerda del perfil aerodinámico en las palas y el ángulos de torsión en presencia de un difusor DAWT. [2].

Para una VAWT se desarrolló de un algoritmo genético aplicando una optimización multiobjetivo basada en los resultados de las fuerzas de sustentación y arrastre de perfiles aerodinámicos en CFD 2D. Esto le da al diseñador herramientas para seleccionar la mejor opción según su requerimiento para seleccionar de un conjunto de soluciones óptimas. [3].

Para una VAWT – Savonius se mejoró el coeficiente de potencia con un nuevo propuesta de diseño de una turbina con tres rotores y en un arreglo triangular para el mismo campo de flujo. [4].

Para una HAWT se propone el uso de palas curvas y se optimiza la geometría, aumentando el coeficiente de potencia y disminuyendo las fuerzas de empuje. La optimización se consigue mediante un algoritmo multiobjetivo incluyendo en las variables de simulación: la distribución de cuerda, el ángulo de giro y la línea eje de apilamiento tridimensional. [5].



Para una HAWT, la inclusión de nuevos materiales como el caso del lino como fibra de origen natural para la construcción de las palas de las turbinas, se confirma que es aceptable para la seguridad y estabilidad estructural, para pequeños aerogeneradores. [6].

Para una VAWT - tipo H de pala recta, se determinó analíticamente el campo de flujo con modelos de turbulencia 3D en CFD (RANS - modelo $k-\omega$ SST) y se validó los resultados de campo de flujo y rendimiento energético mediante pruebas experimentales de túnel de viento. [7]

Para una HAWT, se presentó el estudio de la influencia negativa de la turbulencia de entrada y la pérdida dinámica sobre el rotor. Los estudios fueron realizados mediante pruebas experimentales de túnel de viento. [8]

Para HAWT se mostró el aumento del rendimiento aerodinámico por el efecto de la inclusión de protuberancias en hojas rectas en la zona de baja velocidad. [9]

Para LWS, se desarrolló un algoritmo basado en la optimización del enjambre (PSO) que permite optimizar el diseño de perfiles aerodinámicos para los aerogeneradores que trabajan a bajas velocidades de viento. Como resultado el rendimiento aerodinámico se incrementó para el perfil de estudio en un 18%. [10]

Para una VAWT-tipo H, se desarrolló algoritmo genético a un TSR de 1, para la optimización del perfil de sustentación y para mejorar a su vez el rendimiento de potencia. La simulación se realizó en CFD para 3D. [11]

Para un PARQUE EÓLICO, se presenta una investigación bibliográfica, sobre influencia de la topografía del terreno y sus efectos sobre la interacción de flujos turbulentos de entrada en las turbinas eólicas HAWT y sus efectos en el arreglo de los parques eólicos. [12]

Para una HAWT, se estudió el efecto de la presencia de partículas en el viento, se analizó la influencia de la concentración y el tamaño de las partículas y los efectos en la disminución del rendimiento aerodinámico. [13]

Para HAWT utilizando la teoría del Momento de elemento (BEM) se desarrolló un modelo matemático (método de dos variables de Newton-Rapheson usando MATLAB) para el diseño mejorado de palas de rotor para diferentes aplicaciones con peso optimizado y alto rendimiento aerodinámico. [14]

Para HAWT se validaron por método analítico simulaciones CFD - 3D, doce modelos de turbulencia (Eddy-Viscosity Models y Reynolds Stress Models) con resultados cuantitativamente confiables. [15]

Para HAWT se presenta un estudio matemático detallado de la ecuación de Betz y las dificultades en su derivación y en la aplicación. La demostración del límite Betz nos concluye que la máxima eficiencia teórica de una turbina eólica ideal es del 59%. [16]

Para HAWT se investigó mediante pruebas de túnel de viento los efectos de la geometría, el número de Reynolds y la dirección de rotación en la autorrotación de placas sometida a flujo de aire. [17]

Para HAWT se presentó un algoritmo de optimización no lineal, basado en un modelo multiobjetivo para mejorar las propiedades estructurales en la raíz de la cuchilla sin disminuir la eficiencia aerodinámica. [18]

Para VAWT se determina el campo de flujo bidimensional y las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre una turbina eólica de eje vertical de hoja recta utilizando túnel de viento. [19]

Para HAWT se presenta un algoritmo de optimización de un perfil aerodinámico de la familia CRA09-B utilizando modelos multibloque para ecuaciones de Navier-Stokes en 2D y que presenta mejor rendimiento en comparación de su modelo anterior CRA09-A, en los términos de su coeficiente de sustentación y arrastre. [20]

5 INVESTIGACION POR DESARROLLAR

Durante la revisión, también se identificaron algunos temas propuesto por los autores para darle continuidad a las investigaciones desarrolladas y las cuales se listan a continuación:

Estudios de simulación 3D de la turbulencia y el efecto de la capa límite según la inclusión de ranuras en la superficie de sustentación. [1]



Para HAWT, desarrollar estudios analíticos y experimentales complementarios para determinar métodos de control activo y pasivo de la capa límite por la inclusión de ranuras sobre los perfiles y la influencia en el rendimiento aerodinámico. [1]

Para completar la optimización de una DAWT, realizar el análisis económico de turbinas con difusor aumentado, en búsqueda del punto óptimo del límite de costos estructurales versus la ganancia de potencia. [2]

Para DAWT desarrollar estudios para determinar la relación entre la geometría del difusor y las características de flujo a través del rotor. [2]

Para VAWT realizar estudios complementarios para la validación del algoritmo genético desarrollado para la simulación del perfil tridimensional. [3]

Para una VAWT – Savonius se requiere estudios para el desarrollo de técnicas experimentales para la validación de resultados analíticos, debido a la naturaleza compleja de las interacciones de flujo y la rotación del rotor de la turbina que no permite fácilmente la fijación de instrumentos en el rotor.[3]

Para una VAWT desarrollar estudios complementarios para el análisis del campo de flujo interactivo alrededor de la turbina Savonius multirotor. [4]"

Para HAWT realizar estudios complementarios para analizar y mejorar el comportamiento de arranque de la turbina en palas curvas, teniendo en cuenta que la disminución del ángulo de torsión de la raíz conduce a un menor par aerodinámico del eje de arranque y también conduciría a un peor comportamiento de arranque. [5]

Para una HAWT, con la inclusión de nuevos materiales como es el caso del lino como fibra de origen natural, realizar estudios complementarios para la validación de la afectación del comportamiento aerodinámico del nuevo material en las palas. [6]

Para una HAWT realizar estudios para el comportamiento estructural de las fibras de origen natural (lino) para turbinas de gran tamaño. [6]

Para una VAWT - tipo H de pala recta, realizar un estudio de independencia de tipo de malla aplicado en as simulaciones CFD 3D, para confirmar los errores numéricos en los cálculos de CFD, debido a las fluctuación de los coeficientes de empuje y potencia.[7]

Para pequeñas HAWT desarrollar estudios para la optimización de perfiles aerodinámicos y determinación experimental de coeficientes de sustentación y arrastre a Reynolds bajos. [8]

Para HAWT, realizar estudios para analizar el rendimiento de potencia con la inclusión de protuberancia en los perfiles helicoidales normalmente utilizados. [9]

Para LWS, se desarrolló un algoritmo basado en la optimización del enjambre (PSO), se propone la validación del diseño analítico mediante pruebas experimentales y además la aplicación para otros tipos de perfiles aerodinámicos. [10].

Para una VAWT-tipo H, se desarrolló algoritmo genético a un TSR de 1 mono objetivo, para darle continuidad al estudio se propone desarrollar un sistema de optimización multiobjetivo partiendo del estudio entregado.

Para una VAWT-tipo H y aplicando el algoritmo genético propuesto, desarrollar las simulaciones para determinar el rendimiento de potencia a TSR más altos y presentar completamente el rendimiento en diversos entornos de viento. [11]

Para un PARQUE EÓLICO desarrollar una 'teoría' basada en la física para la superposición de múltiples estelas en flujos turbulentos de los aerogeneradores. [12]

Para un PARQUE EÓLICO desarrollar estrategias de simulación para la predicción de toda la gama de escalas de interés en aerodinámica de parques eólicos en acoplamiento de modelos meteorológicos basados en ecuaciones de turbulencia RANS [12]

Para una HAWT y para complemento del estudio del efecto de la presencia de partículas, desarrollar estudios del efecto de la lluvia en el rendimiento aerodinámico. [13]

Para una HAWT validar experimentalmente los resultados del método de dos variables de Newton-



Rapheson utilizados para el diseño de palas de rotor en diferentes aplicaciones con peso optimizado y rendimiento aerodinámico. [14]

Para HAWT para darle continuidad al estudio del fenómeno Magnus de autorrotación de una placa y desarrollar pruebas experimentales en el túnel de viento para determinar el efecto de la geometría de la placa en flujo 3D en el valor numérico del coeficiente de fuerza de rotación media. [17]

Para HAWT para validar el algoritmo de optimización propuesto, y con la finalidad de finalizar todas las etapas de diseño e implementación, se propone realizar un prototipo de prueba, para evaluarlo en condiciones reales y evaluar su desempeño. [20].

6 CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los artículos analizados en este documento es posible mencionar las siguientes conclusiones:

- Con respecto a la selección del tipo de turbina y según la escala de la generación eléctrica la mayor atención de los investigadores de las turbinas eólicas se centró principalmente en las HAWT debido a su mayor eficiencia, lo que hace que esta industria se haya desarrollado con mayor intensidad a la fecha.
- Para las aplicaciones de menor tamaño y variabilidad del campo de flujo, se nota que en esta última década, ha iniciado un creciente interés en los VAWT, las cuales se consideran más adecuados para aplicaciones de menor potencia y zonas urbanas en comparación con las HAWT. En las zonas urbanas donde el entorno del viento es muy complejo, se considera que los VAWT a pequeña escala tienen un mejor rendimiento que sus contrapartes HAWT debido a su capacidad para trabajar en direcciones de viento variadas, una mayor adaptabilidad a flujos turbulentos o sesgados y un menor nivel de ruido.
- Con respecto a los perfiles aerodinámicos, se ha identificado familias de perfiles que se han creado para la industria aérea desde años 60 y para las HAWT desde los años 90. Aunque esas familias de perfiles no están personalizadas para las VAWT, pueden usarse

como plantillas originales y luego ser optimizadas para aplicaciones específicas de las VAWT, lo cual es mucho más fácil que diseñar familias de perfiles nuevas. La base de datos de la NACAR creada desde 1960 ha desarrollado una biblioteca de perfiles aerodinámicos con análisis teóricos y experimentales principalmente en túnel de viento y es una buena fuente de series de perfiles aerodinámicos de alto rendimiento.

- Con respecto al método de investigación para la determinación de propiedades de los perfiles aerodinámicos la mayor investigación se centra en el método analítico y aplicando como herramienta principal la simulación en CFD el cual está desarrollado y respaldado por las principales tecnologías informáticas, los resultados generados son precisos y están acordes con los datos experimentales cuando han sido posible su determinación.
- El diseño de sistemas de conversión de energía eólica es una tarea muy compleja y requiere habilidades interdisciplinarias complementarias, como civil, mecánica, eléctrica y electrónica, geografía, aeroespacial, y ambiental entre muchas.

7 ABREVIATURAS

ABL	Atmospheric boundary layer.
AEP	Annual energy production
BEM	Blade Element Momentum
BET	Blade element theory
COE	cost of energy
CSCF	Constant Speed Constant Frequency
DAWT	Diffuser augmented wind turbine
GA	Genetic algorithm.
GRP	Glass fiber Reinforced Plastics
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
IEC	International Electrotechnical Commission.
LDV	Laser Doppler Velocimeter
LWS	Low wind speed
MOEA	Multi-objective evolutionary algorithm
NACA	National Advisory Committee of Aeronautics
NREL	National Renewable Energy Laboratory.
NURBS	Non-uniform rational basis spline
O&M	Operation & Maintenance cost.
PSO	Particle Swarm Optimization
SEIG	Self Excited Induction Generators
TSR	Tip Speed Ratio
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
VSCF	Variable Speed Constant Frequency



VSVF Variable Speed Variable Frequency
WECS Wind Electric Conversion System.

8 AGRADECIMIENTOS

Mi sincero agradecimiento a la directora Sandra Velarde con su ayuda en la estructuración del tema y la revisión del documento, también agradecimientos a la ayuda incondicional de mis compañeros de master Mario Varela, Gerardo García y Luis Santamaría los cuales hicieron de mi permanencia en la Universidad una gran experiencia académica, sus aportes técnicos y ayudas logísticas facilitaron mi año de estudio y sus valiosos aportes me han ayudado a mejorar la calidad del documento y a una presentación adecuada de mi TFM.

9 REFERENCIAS

- [1] Belamadi, R., Djemili, A., Ilinca, A., & Mdouki, R. (2016). Aerodynamic performance analysis of slotted airfoils for application to wind turbine blades. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 151, 79–99.
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.01.011>.
- [2] Vaz, J. R. P., & Wood, D. H. (2016). Aerodynamic optimization of the blades of diffuser-augmented wind turbines. *Energy Conversion and Management*, 123, 35–45.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.015>.
- [3] Huque, Z., Zemmouri, G., Harby, D., & Kommalapati, R. (2012). Optimization of wind turbine airfoil using nondominated sorting genetic algorithm and Pareto optimal front. *International Journal of Chemical Engineering*.
<https://doi.org/10.1155/2012/193021>
- [4] El-Baz, A. R., Youssef, K., & Mohamed, M. H. (2015). Innovative improvement of a drag wind turbine performance. *Renewable Energy*.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.102>
- [5] Shen, X., Yang, H., Chen, J., Zhu, X., & Du, Z. (2016). Aerodynamic shape optimization of non-straight small wind turbine blades. *Energy Conversion and Management*.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.008>
- [6] Park, H. (2016). A study on structural design and analysis of small wind turbine blade with natural fibre(flax) composite. *Advanced Composite Materials*, 25(2), 125–142.
<https://doi.org/10.1080/09243046.2015.1052186>
- [7] Li, Q., Maeda, T., Kamada, Y., Murata, J., Kawabata, T., Shimizu, K., Ogasawara, T., Nakai, A., & Kasuya, T. (2016). Wind tunnel and numerical study of a straight-bladed vertical axis wind turbine in three-dimensional analysis (Part I: For predicting aerodynamic loads and performance). *Energy*, 106, 443–452.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.089>
- [8] Li, Q., Kamada, Y., Maeda, T., Murata, J., & Nishida, Y. (2016). Effect of turbulent inflows on airfoil performance for a Horizontal Axis Wind Turbine at low Reynolds numbers (Part II: Dynamic pressure measurement). *Energy*, 112, 574–587.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.126>
- [9] Huang, C. C., Bai, C. J., Shiah, Y. C., & Chen, Y. J. (2016). Optimal design of protuberant blades for small variable-speed horizontal axis wind turbine-experiments and simulations. *Energy*, 115, 1156–1167.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.100>
- [10] Pang, X., Wang, H., & Chen, J. (2018, July 1). Intelligence algorithm for optimization design of the low wind speed airfoil for wind turbine. *Cluster Computing*, 1–11.
<https://doi.org/10.1007/s10586-017-1635-4>
- [11] Ma, N., Lei, H., Han, Z., Zhou, D., Bao, Y., Zhang, K., Zhou, L., & Chen, C. (2018). Airfoil optimization to improve power performance of a high-solidity vertical axis wind turbine at a moderate tip speed ratio. *Energy*, 150, 236–252.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.115>
- [12] Porté-Agel, F., Bastankhah, M., & Shamsoddin, S. (2019). Wind-Turbine and Wind-Farm Flows: A Review. *Boundary-Layer Meteorology*.
<https://doi.org/10.1007/s10546-019-00473-0>
- [13] Guo, T., Jin, J., Lu, Z., Zhou, D., & Wang, T. (2019). Aerodynamic sensitivity analysis for a wind turbine airfoil in an air-particle two-phase flow. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(18).
<https://doi.org/10.3390/app9183909>
- [14] Bavanish, B., & Thyagarajan, K. (2013). Optimization of power coefficient on a horizontal axis wind turbine using bem theory. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 26, pp. 169–182)*. Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.009>
- [15] Abdulqadir, S. A., Iacovides, H., & Nasser, A. (2017). The physical modelling and aerodynamics of turbulent flows around horizontal axis wind turbines. *Energy*, 119, 767–799.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.060>
- [16] Drahansky, M., Paridah, M. ., Moradbak, A., Mohamed, A. ., Owolabi, F. abdulwahab taiwo, Asniza, M., & Abdul Khalid, S. H. . (2016). Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio.
<https://doi.org/DOI:10.5772/21398>
- [17] Huang, P., Lin, H., & Gu, M. (2019). Wind tunnel investigation of autorotation of plate: The effects of geometry, Reynolds number and rotation direction. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 104012.
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.104012>
- [18] Li, X., Yang, K., Bai, J., & Xu, J. (2016). A new optimization approach to improve the overall performance of thick wind turbine airfoils. *Energy*, 116, 202–213.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.108>
- [19] Li, Q., Maeda, T., Kamada, Y., Murata, J., Furukawa, K., & Yamamoto, M. (2016). The influence of flow field and aerodynamic forces on a straight-bladed vertical axis wind turbine. *Energy*, 111, 260–271.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.129>
- [20] ZHANG, W., SUN, J., WANG, L., WU, J., & HE, L. (2020). Rotor airfoil aerodynamic design method and wind tunnel test verification. *Chinese Journal of Aeronautics*, June.
<https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.03.013>