



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE EXTRACTOR - DOBLE AEROGENERADOR PARA EL APROVECHAMIENTO DE AIRE RESIDUAL Y GENERACIÓN DE ENERGÍA EN UN INVERNADERO

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

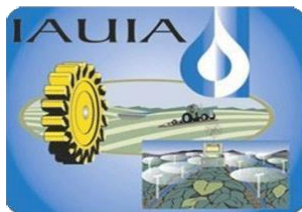
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

Presenta:

IVONN ALEJANDRA RAMÍREZ GARCÍA

Bajo la supervisión de:

EUGENIO ROMANTCHIK KRIUCHKOVA, DR.



Chapingo, Estado de México, noviembre de 2025

**DISEÑO Y EVALUACION DE UN SISTEMA DE EXTRACTOR - DOBLE
AEROGENERADOR PARA EL APROVECHAMIENTO DE AIRE
RESIDUAL Y GENERACION DE ENERGIA EN UN INVERNADERO**

Tesis realizada por el C. Ivonn Alejandra Ramírez García bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR:  _____

Dr. Eugenio Romantchik Kriuchkova

ASESOR:  _____

Dr. Gilberto de Jesús López Canteñs

ASESOR:  _____

Dr. Eduardo Ríos Urbán

ASESOR:  _____

Dr. Pedro Cruz Meza

INDICE GENERAL

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE CUADROS	ix
DEDICATORIA.....	x
AGRADECIMIENTOS	xi
DATOS BIOGRÁFICOS	xii
RESUMEN GENERAL	xiii
GENERAL ABSTRACT.....	xiv
1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	15
1.1 Objetivo general	17
1.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 Organización de la tesis	17
1.4 Referencias.....	18
2. TEORÍA Y PRUEBAS CON DOBLE AEROGENERADOR	20
2.1 Balance de energía del extractor de con doble aerogenerador	20
2.2 Metodología de investigación	22
2.2.1 Diseño de extractor – aerogenerador doble rotor	22
2.2.2 Instalación de equipos	23
2.2.3 Instrumentación.....	25
2.2.4 Mediciones en campo.....	26
2.2.5 Evaluación del dispositivo extractor-doble aerogenerador.....	26
2.2.6 Parámetros de medición.	27
2.2.7 Parámetros calculados.....	27
2.2.8 Eficiencia.....	29
2.9 Mediciones en banco de pruebas.....	30
2.3 Resultados y discusiones	31
2.3.1 Resultados del generador eléctrico en banco de pruebas	31
2.3.2 Resultados de potencia eólica a la salida del primer aerogenerador	32
2.3.3 Resultados de eficacia real del ensamble extractor-doble aerogenerador	35
2.3.4 Comparación de resultados del banco de pruebas con experimento ...	36
2.4 Conclusiones.....	36
3. ANALISIS DE ARTICULOS CIENTIFICOS SOBRE DOBLE ROTOR.....	38

3.1 Resumen	38
3.2 Introducción	40
3.3 Materiales y métodos	41
3.4 Resultados y discusión	42
3.4.1 Funcionamiento de DRWT y SRWT en diferentes condiciones operativas	42
3.4.2 Influencia de la distancia entre rotores DRWT	43
3.4.3 Estudio comparativo de DRWT en configuración co-rotativa y contrarrotante	44
3.4.4 Estudio experimental sobre aero dinámica y características de estela en turbinas eólicas de doble rotor con sentido de giro rotante y contrarrotante.	46
3.4.5 Modelación matemática de turbinas eólicas conforme al efecto aerodinámico en rotores y carga eléctrica en el circuito local del generador.	47
3.4.6 Simulación de CDF para turbinas CO-DRWT y CR-DRWT con diferentes tamaños de rotor.	48
3.4.7 Estudio experimental en túnel de viento con modelos a escala sobre rendimiento aerodinámico y características de estela en CR-DRWT y CO-DRWT.....	49
3.4.8 Simulación de par resultante, potencia aerodinámica y potencia eléctrica en MATLAB/Simulink de una CR-DRWT	51
3.4.9 Algoritmo de control integrado que maximiza la potencia de salida de una CO-DRWT.....	54
3.5 Conclusiones.....	58
3.6 Referencias.....	59
4. ANÁLISIS DE PATENTES DE DISEÑO Y SISTEMAS DE DOBLE ROTOR	73
4.1 Resumen.....	73
4.2 Introducción	74
4.3 Materiales y métodos	77
4.4 Resultados y discusión	77
4.4.1 Cantidad de patentes lugar de procedencia	77
4.4.2 Resultado de comparación de patentes.....	78
4.5 Conclusiones.....	94
5. SOLICITUD DE PATENTE A IMPI	104
5.1 Solicitud de IMPI.....	104

5.2 Ensamble de extractor-aerogenerador de doble rotor	104
5.2.1 Campo técnico de la invención.....	104
5.2.2 Objeto de la invención.....	105
5.2.3 Breve descripción del invento	106
5.2.4 Breve descripción de las figuras	107
5.2.5 Descripción detallada del invento	107
5.2.7 Reivindicaciones.....	111
6. CONCLUSIONES GENERALES	114
6.1 CONCLUSIONES	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Transformaciones de energía presentes en el extractor.	20
Figura 2. Transformaciones de energía presentes en ambos aerogeneradores.	21
Figura 3. Vista isométrica del dispositivo extractor - aerogenerador doble rotor.	22
Figura 4. a) Ensamble aerogenerador-extractor, b) Instalación de segundo generador.	23
Figura 5. Medición de velocidad a) salida de primer aerogenerador y b) antes de pasar por segundo aerogenerador.....	24
Figura 6. Ensamble con resistencia a diferentes distancias.....	25
Figura 7. Variación de distancia entre el ensamble y la resistencia de cartón.	25
Figura 8. Instrumentos de medición, a) anemómetros, b) multímetro.	26
Figura 9. Puntos de medición.....	28
Figura 10. a) Sensor de torque, b) prueba realizada en laboratorio.....	30
Figura 11. Relación corriente eléctrica - voltaje en función de rpm.....	31
Figura 12. Potencia eléctrica en función de rpm.	31
Figura 13. Incremento de voltaje con respecto a la distancia de separación entre rotores.....	32
Figura 14. Resultados de la prueba del extractor con conjunto de resistencia de cono y con un aerogenerador variando la distancia de 20 a 140 cm, a) caudal medio de aire de salida (m^3/s), b) potencia eólica (W).	32
Figura 15. Relación potencia eléctrica - distancia entre aerogeneradores.....	34
Figura 16. Comparación banco de pruebas – experimento.	36
Figura 17. Relación de velocidad frente a la separación del segundo rotor.....	44
Figura 18. Esquemas de aerogenerador a) y c) industrial; b) y d) con una a), b) doméstico; con una a) y b) o dos c) y d) turbinas.	75

Figura 19. Ejemplos de aplicación de doble rotor en aerogeneradores.	76
Figura 20. Patentes por país.	78
Figura 21. Sentido de giro a) contrarrotante, b) rotante, c) doble.	79
Figura 22. Tamaño de las aspas del generador a) mismo tamaño, b) primeras más pequeñas, c) primeras más grandes.	79
Figura 23. Patente GB2347178A.	80
Figura 24. Distancia horizontal entre las aspas, a) separación corta, b) separación más grande, c) lado opuesto del generador.	80
Figura 25. Posición de aspas, a) mismo lado del generador, b) lado opuesto del generador.	81
Figura 26. Transmisión del aerogenerador con dos turbinas y a) un generador, b) dos generadores, y c) un generador con dos rotores (interno y externo) sin estator, (1 y 2 – turbinas, 3 - góndola, 4 – eje, 5 – generador.	82
Figura 27. CN117013776, ejemplo de aplicación (1 eje principal).	82
Figura 28. Ejemplos de tipo de transmisión, a) engranajes planetarios, b) engranes magnéticos.	83
Figura 29. Aerogenerador de doble rotor con generador compuesto y transmisión a) sin cajas, b) con una caja, c) con dos cajas.	84
Figura 30. Aerogenerador a) dos generadores, b) un generador.	84
Figura 31. Ubicación del generador a) vertical, b) horizontal.	85
Figura 32. Diferentes diseños de juegos de aspas con mayor cantidad de palas, a) 1er juego 6 palas, 2 juegos 5 palas, 3er juego palas, b) 1er juego 14 palas, 2do juego 3 palas, c) 1er juego 5 palas, 2do juego 6 palas.	86
Figura 33. Ejemplos, a) CN106988965A, b) CN109441711A, c) CN104533720A.	86
Figura 34. Perfil aeroespacial RAF89.	87
Figura 35. Vista del generador eólico con eje de rotación horizontal.	87
Figura 36. Vista por la sección B-B que es la vista frontal sobre la turbina de	

sotavento.	88
Figura 37. Método de detección y supresión de vibración de palas (CN117212040A).	89
Figura 38. Vista esquemática de un dispositivo para controlar las variaciones del paso de cualquier álabe de las ruedas de paletas (US2653250A).	90
Figura 39. Coeficientes de potencia de varios rotores eólicos.	91
Figura 40. Comprobante de recepción de patente MX/E/2025/070440.	104
Figura 41. Explosionado del ensamble.	108
Figura 42. Tipo de transmisión.	109
Figura 43. Vista frontal del ensamble.	113
Figura 44. Vista lateral del ensamble.	113

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Radios y Áreas de anillos de medición.....	28
Cuadro 2. Resultados del experimento realizado.....	34
Cuadro 3. Principales parámetros del conjunto extractor-aerogenerador.	35
Cuadro 4. Literatura consultada	56
Cuadro 5. Clasificación de patentes por país.....	78
Cuadro 6. Características de diseño por patente	92

DEDICATORIA

A mis padres, Rosalba García y Alberto Ramírez, por brindarme su confianza y apoyarme incondicionalmente.

A Claudia y Andrea, mis hermanas, por acompañarme y apoyarme en mis decisiones

A Rodrigo Carmona, por motivarme siempre.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua por darme la oportunidad de continuar con mi formación profesional.

A la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada.

Agradezco a mi comité asesor, al Dr. Eugenio Romantchik Kriuchkova, mi director de tesis, por su apoyo y guía en el desarrollo de esta investigación, gracias por su paciencia y consejos. Al Dr. Pedro Cruz Meza, por su valioso apoyo. Al Dr. Gilberto de Jesús López Canteñs, por su asesoramiento para mejorar esta investigación. Al Dr. Eduardo Ríos Urban, por la oportunidad brindada durante el proceso.

Agradecimiento especial al Ingeniero Mario por su apoyo en la realización de las pruebas en el laboratorio de electricidad automotriz.

DATOS BIOGRÁFICOS



DATOS PERSONALES

Nombre	Ivonn Alejandra Ramírez García
Fecha de nacimiento	19 de enero de 1998
Lugar de nacimiento	Iztapalapa, Ciudad de México
CURP	RAGI980119MDFMRV03
Profesión	Ingeniero en Energía Renovable
Cédula profesional	13393856

DESARROLLO ACADÉMICO

Preparatoria	CBT No. 4 “Texcoco”
Licenciatura	Ingeniería en Energía Renovable, Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan

RESUMEN GENERAL

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE EXTRACTOR - DOBLE AEROGENERADOR PARA EL APROVECHAMIENTO DE AIRE RESIDUAL Y GENERACIÓN DE ENERGÍA EN UN INVERNADERO

Recuperar energía eólica residual de un extractor de aire de invernadero representa una forma constante de producción de energía limpia reduciendo los gastos en consumo eléctrico dentro del invernadero. En estudios anteriores se ha demostrado que la aplicación de un aerogenerador a la salida de un extractor de aire de invernadero permite recuperar energía eólica liberada en el ambiente y generar energía eléctrica a partir de ella. De esta manera, la presente investigación tuvo como objetivo principal diseñar y evaluar un nuevo sistema de generación de energía eléctrica a partir de un ensamble de extractor-aerogenerador agregando un segundo rotor. Se analizó la teoría, el diseño y funcionamiento de los aerogeneradores de doble rotor publicados en artículos y patentes. Se examinó el balance de energía del ensamble a partir de transformaciones de la potencia eléctrica del motor del extractor hacia el primer aerogenerador y finalmente hacia el segundo aerogenerador, obteniendo una eficiencia máxima teórica de recuperación de 0.75. Se desarrolló el diseño del dispositivo mediante el uso de SolidWorks, con el que además se presentó la solicitud de patente (modelo de utilidad) ante IMPI con el nombre “Ensamble de extractor-aerogenerador de doble rotor”. En las pruebas realizadas, se utilizaron dos aerogeneradores de 500 W, con los cuales se realizaron mediciones de revolución, velocidades de aire a las entradas y salidas de los dispositivos, voltaje y corriente eléctrica considerando una distancia de separación de 0.20 m a 1.40 m entre ambos aerogeneradores. Esta investigación demuestra que con la instalación del segundo rotor se logra obtener una eficacia real del ensamble (extractor y doble aerogenerador) hasta 0.47.

Palabras clave: ensamble, eficiencia, transformación, generador, diseño, análisis.

Tesis de Maestría en Ingeniería. Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Ing. Ivonn Alejandra Ramirez Garcia.

Director de tesis. Dr. Eugenio Romantchik Kriuchkova.

GENERAL ABSTRACT
DESIGN AND EVALUATION OF AN EXHAUST FAN-DOUBLE WIND
TURBINE SYSTEM TO TAKE ADVANTAGE OF RESIDUAL AIR AND
ENERGY GENERATION IN A GREENHOUSE

Recovering residual wind energy from a greenhouse exhaust fan represents a steady way of clean energy production, reducing electrical consumption costs inside the greenhouse. Previous researches have shown that adding a wind turbine to the outlet of a greenhouse exhaust fan allows the recovery of wind energy released into the environment and generates electrical energy from it. In this way, the main objective of this research was to design and evaluate a new generation electrical energy system based on an exhaust fan-wind turbine adding a second rotor. The theory, design and dual rotor wind turbines operation published in scientific articles and patents were analyzed. The system energy balance was examined from the motor electrical power to the first wind turbine and then to the second wind turbine, getting a maximum theory recovery efficiency of 0.75. A design of the system was developed using SolidWorks, with which we presented a patent request (utility model) to the Mexican Institute of Industrial Property (IMPI) called "Dual rotor wind turbine exhaust fan assembly". During the experimental tests, two 500W wind turbines were used, and revolution per minute, outlet and inlet air speed of the devices, voltage and electrical current were taken, considering separations distances from 0.20 m to 1.40 m between both wind turbines. This research shows when adding a second rotor is possible to obtain real efficiency of the system (exhaust fan and double wind turbine) up to 0.45.

Keywords: assembly, efficiency, transformation, generator, design, analysis

Master's Thesis in Engineering, Graduate Program in Agricultural Engineering and Integrated Water Use, Chapingo Autonomous University.

Author: Ivonn Alejandra Ramirez Garcia.

Thesis Director: PhD. Eugenio Romantchik Kriuchkova.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

En entornos cerrados que cuenten con mala ventilación, se presentan problemas, los cuales pueden ser la falta de circulación de aire, la generación de gases no deseado y la acumulación de polvo, etc. Al no tratar estas dificultades, se afecta al funcionamiento del equipo y alimentos en un invernadero.

Se emplea el uso de extractores de aire, lo cual soluciona los inconvenientes relacionados con la circulación de aire dentro del invernadero y así mejorar las condiciones operativas del mismo.

Los extractores de aire expulsan aire del invernadero al exterior con una velocidad que hace posible instalar una turbina eólica frente a ellos, lo cual permite convertir la energía eólica residual en electricidad (Patnaik & Ali, 2013) (Ali et al., 2019). De igual manera, investigaciones anteriores han demostrado que los extractores son más efectivos cuando se usan en conjunto con una turbina eólica (Etchamendi et al., 2021), (Balderas, 2023).

Además, la patente mexicana MX412726B ofrece un sistema para evaluar y caracterizar el flujo de aire que expulsan los extractores (Coronado Vazquez, 2024). Esto ayuda a determinar las características necesarias que debe tener una turbina eólica para que se maximice el aprovechamiento del aire que los extractores de aire expulsan.

La única desventaja de las propuestas anteriores es que no toda la energía residual que se libera a través de los extractores de aire se transforma en electricidad. Conforme al Límite de Betz (Villarrubia López, 2012) la cantidad máxima teórica que se puede convertir es del 59%. Sin embargo, de ese 59% únicamente se logra utilizar del 35% al 45%, lo que indica que el resto de la energía eólica residual que pasa entre las aspas de la turbina eólica nuevamente se libera en la atmósfera.

El principio del doble rotor ha sido conocido desde la época de Mikhail

Lomonósov, a quien se le reconoce como el creador de los rotores coaxiales en 1754 al presentar un modelo de helicóptero con rotores coaxiales en la Academia Rusa de las Ciencias (Kurisinkai, 2023), desde entonces el concepto ha sido objeto de estudio y desarrollo.

Actualmente se encuentran en desarrollo innovaciones para equipos y dispositivos que operan con un sistema de doble rotor con el propósito de maximizar el uso de la energía del aire en movimiento y convertir esta energía eólica en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica (Chihai et al., 2016), (Ramasamy & Uarc-Afdd, 2013).

A través de la teoría clásica, Newman (1983) determinó que el coeficiente de potencia máximo de una turbina eólica con dos rotores sin pérdidas incrementa aproximadamente un 64%. Booker et al., 2010 han creado un generador compacto y eficiente que rota en sentido contra-rotativo, el cual es adecuado para turbinas eólicas en entornos urbanos, además desarrolló y realizó pruebas sobre el rendimiento de un generador de imanes permanentes para turbinas eólicas en zonas urbanas.

Además, recientemente en la investigación (Balderas Rivas, 2021) se demuestra la posibilidad de utilizar efectivamente un sistema de extractor-aerogenerador para recuperar energía eólica residual en construcciones agrícolas e industriales. En esta investigación se han examinado patentes y publicaciones científicas sobre turbinas eólicas de doble rotor, poniendo particular atención en el diseño, estudio teórico y práctico, cómo se relaciona el tamaño de las aspas de ambos rotores, ubicación de rotores, cantidad de aspas, sentido de giro, tipo de transmisión, etc.

Este estudio investiga las características de diseño y funcionamiento de una turbina de doble rotor con el propósito de proponer un nuevo sistema de ensamble extractor-aerogenerador de doble rotor para el aprovechamiento de energía eólica residual de invernadero. Los materiales utilizados en esta investigación incluyen un extractor de eje axial y dos turbinas eólicas de 500W, así como instrumentos de medición necesarios para las pruebas realizadas.

1.1 Objetivo general

Diseñar y evaluar un nuevo sistema de generación de energía eléctrica a partir de un ensamble de aerogenerador – extractor agregando un segundo rotor al diseño para aumentar el aprovechamiento de aire residual en un invernadero.

1.2 Objetivos específicos

- Investigar y analizar en esquemas de patentes y en artículos científicos las características de funcionamiento de doble rotor conforme a las investigaciones teóricas y experimentales para proponer un diseño de mejora para el ensamble aerogenerador – extractor agregando un segundo rotor.
- Desarrollar una metodología de pruebas y evaluación para el ensamble, instalar e instrumentar el ensamble de extractor - doble aerogenerador.
- Realizar el análisis teórico y experimental de funcionamiento del ensamble extractor – aerogenerador de doble rotor.

1.3 Organización de la tesis

Esta tesis está compuesta por los siguientes 6 capítulos:

- En el capítulo I se incluye una introducción general
- El capítulo II contiene la teoría del balance de energía en el ensamble extractor-doble aerogenerador, así como la metodología de investigación, se presentan y explican los resultados teóricos y de las pruebas realizadas en campo.
- En los capítulos III y IV se muestra el trabajo realizado correspondiente al trabajo de investigación, en ambos apartados se presenta el análisis de artículos científicos y patentes a manera de artículos científicos de revisión.
- En el capítulo V se anexa una breve descripción de la solicitud de patente (modelo de utilidad) presentada ante IMPI
- El capítulo VI presenta conclusiones generales.

1.4 Referencias

- Ali, W., Gan, L., Jamil, M., Farooq, H., Faraz, A., & Ahmad Khan, H. O. (2019). Development of Wind Power Based Micro-Generation Electricity System by Means of Exhaust Fan and its Techno-Economic Evaluation. *1st International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering, ICECCE* 2019. <https://doi.org/10.1109/ICECCE47252.2019.8940708>
- Balderas, B. R. (2023). *ENSAMBLE DE EXTRACTOR-AEROGENERADOR PARA APROVECHAMIENTO DE AIRE RESIDUAL Y GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA* (Patent MX/u/2021/000593). INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INTELECUAL. <https://siga.impi.gob.mx/>
- Balderas Rivas, B. (2021). *Diseño, construcción y evaluación de un dispositivo: extractor axial - aerogenerador con eje horizontal*. <https://hdl.handle.net/20.500.12098/1091>
- Booker, J. D., Mellor, P. H., Wrobel, R., & Drury, D. (2010). A compact, high efficiency contra-rotating generator suitable for wind turbines in the urban environment. *Renewable Energy*, 35(9), 2027–2033. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2010.02.003>
- Chihaiia, O. G., El-Leathey L A, Băbuțanu, N. S., & Voina A. (2016). A REVIEW ON COUNTER-ROTATING WIND TURBINES DEVELOPMENT. *JOURNAL OF SUSTAINABLE ENERGY*, 7(3).
- Coronado Vázquez, D. R. (2024). *BANCO DE PRUEBAS PARA EVALUACION Y CARACTERIZACION DEL FLUJO DE AIRE EXPULSADO POR EXTRACTORES PARA SU APROVECHAMIENTO EN AEROGENERADORES*. (Patent MX412726B). IMPI. <https://siga.impi.gob.mx/>
- Etchamendi, A. C. S., Frigo, J. P., & Junior, O. H. A. (2021). Propuesta de un Sistema Eólico con Ducto Direccionador para el Aprovechamiento de la Energía Residual de una Avícola. *Acta Iguazu*, 10(1), 1–21. <https://doi.org/10.48075/ACTAIGUAZ.V10I1.24035>
- Kurisinkai, B. (2023). *Structural Optimization of Coaxial Configuration Drone* [Chemnitz University of Technology]. https://www.researchgate.net/publication/368607762_Structural_Optimization_of_Coaxial_Configuration_Drone
- Patnaik, A., & Ali, S. M. (2013). INDUSTRIAL EXHAUST FANS AS SOURCE OF POWER. *International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication*, 1, 2320–2084.
- Ramasamy, M., & Uarc-Afdd. (2013). Measurements Comparing Hover

Performance of Single, Coaxial, Tandem, and Tilt-Rotor Configurations.
69th Annual American Helicopter Society. Forum, Phoenix, AZ, USA.

Villarrubia López, Miguel. (2012). *Ingeniería de la energía eólica*.
https://books.google.com/books/about/Ingenier%C3%ADa_de_la_energ%C3%ADa_e%C3%B3lica.html?hl=es&id=GW_jEgJJScC

2. TEORÍA Y PRUEBAS CON DOBLE AEROGENERADOR

2.1 Balance de energía del extractor de con doble aerogenerador

En este trabajo se busca representar la transformación de todas las formas de energía presentes en un ensamble extractor-aerogenerador de doble aerogenerador durante el proceso de transformación de energía a partir de un balance de energía, en el que se obtenga también la cantidad de energía recuperada del extractor.

Primero se definió la potencia consumida por el motor eléctrico del extractor (P_{elm}), esta potencia se gasta a la potencia de aire de salida (P_{sal}) y las pérdidas en la transformación de energía (P_{trans}), siendo la Ecuación (1) de la siguiente manera (Figura 1):

$$P_{elm} = P_{sal} + P_{trans} \quad (1)$$

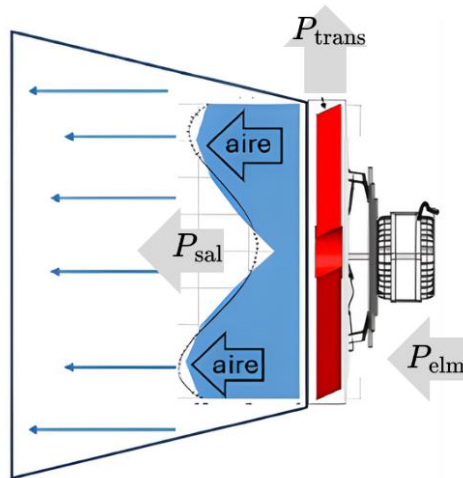


Figura 1. Transformaciones de energía presentes en el extractor.

Teóricamente las pérdidas de transformación consideradas en el extractor de aire están dadas de la siguiente manera:

$$P_{trans} = (0.02 + 0.03 + 0.04)P_{elm} \quad (2)$$

En la Ecuación (2) se están considerando pérdidas eléctricas (0.02), pérdidas mecánicas (0.03) y pérdidas eólicas (0.04). Por lo tanto, sustituyendo en la

Ecuación (1) se obtiene:

$$P_{aire1} = 0.9P_{elm} \quad (3)$$

Siendo esta la potencia de aire ($P_{sal} = P_{aire1}$) antes de pasar por el primer aerogenerador. Para determinar la potencia de aire recuperada por el aerogenerador 1 del sistema se usa la siguiente ecuación:

$$P_{rec1} = 0.59P_{aire1} \quad (4)$$

Se toma en cuenta que el 59% de la potencia de aire que pasa por el aerogenerador se recupera conforme al límite de Betz y sustituyendo a la Ecuación (4) de la Ecuación (3) se tiene que la potencia recuperada por el sistema es:

$$P_{rec1} = 0.59(0.9 P_{elm}) = 0.53P_{elm} \quad (5)$$

Hasta este momento, teóricamente se está recuperando el 53% de la potencia consumida por el motor del extractor. Por otro lado, se consideró la potencia de aire salida del primer aerogenerador hacia el segundo aerogenerador, es igual a la potencia de aire 2 (P_{aire2}) antes de pasar por el segundo aerogenerador es la siguiente (Figura 2):

$$P_{aire2} = P_{aire1} - P_{rec1} \quad (6)$$

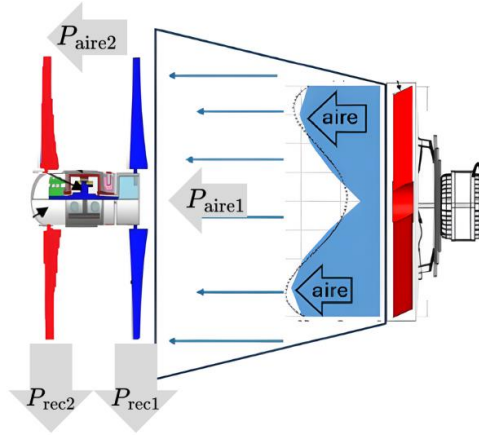


Figura 2. Transformaciones de energía presentes en ambos aerogeneradores.

Sustituyendo las Ecuaciones (3) y (4) en la Ecuación (6) se tiene que la potencia de aire 2 es:

$$P_{aire2} = (0.9P_{elm} - 0.53P_{elm}) = 0.37P_{elm} \quad (7)$$

Entonces, 37% de la potencia del motor del extractor pasa para entrar al segundo

rotor después de ser recuperada en el primero. Para conocer la potencia recuperada por el segundo aerogenerador (P_{rec2}), se considera nuevamente 0.59 correspondiente al límite de Betz, y la potencia de aire 2, siendo:

$$P_{rec2} = 0.59P_{aire2} = 0.59 * (0.37P_{elm}) = 0.22P_{elm} \quad (8)$$

Finalmente, se determina la potencia eléctrica recuperada por el sistema extractor-aerogenerador de doble rotor (P_{recT}):

$$P_{recT} = P_{rec1} + P_{rec2} = (0.593 + 0.22)P_{elm} = 0.75P_{elm} \quad (9)$$

Por lo tanto, de manera teórica se puede aprovechar hasta el 75% de la potencia consumida por el motor del extractor a partir de la implementación de un segundo aerogenerador al sistema.

2.2 Metodología de investigación

2.2.1 Diseño de extractor – aerogenerador doble rotor

En la Figura 3 se presenta el resultado del diseño conceptual 3D con el programa Solid Works de un extractor axial con dos aerogeneradores de eje horizontal, donde se coloca un cono para mejorar el movimiento de aire y una estructura que funciona como unión entre el extractor, el cono y los dos aerogeneradores.

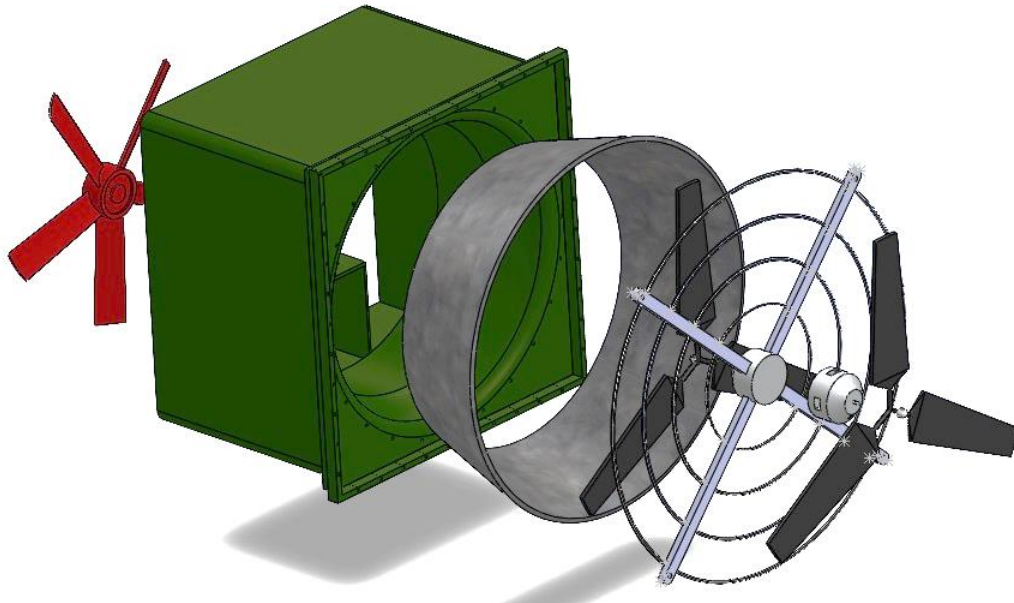


Figura 3. Vista isométrica del dispositivo extractor - aerogenerador doble rotor.

2.2.2 Instalación de equipos

Las pruebas planteadas en el diseño experimental se realizaron en el campo experimental de Energías Renovables y Biosistemas de la Universidad Autónoma Chapingo, en el Estado de México, municipio de Texcoco. Para dichas pruebas se selecciona un extractor Multifan 130 de eje horizontal con 5 aspas, al que se le colocó un cono fabricado de lámina galvanizada calibre 26 acero ASTM A653, con un diámetro en la base menor de 1.2 m y en la base mayor de 1.5 m, con una altura de 0.605 m.

Con las pruebas realizadas en este proceso se busca determinar las condiciones óptimas de potencia eólica de entrada al aerogenerador y la velocidad de salida de aire del extractor en función de la distancia, para posteriormente diseñar un aerogenerador de doble rotor para el aprovechamiento de la energía eólica residual a la salida del extractor de invernadero.

Para realizar las pruebas se utilizó el ensamble de aerogenerador-extractor elaborado en la tesis “DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN DISPOSITIVO: EXTRACTOR AXIAL - AEROGENERADOR CON EJE HORIZONTAL” (Figura 4 A), donde se instaló el segundo aerogenerador (Figura 4 B).

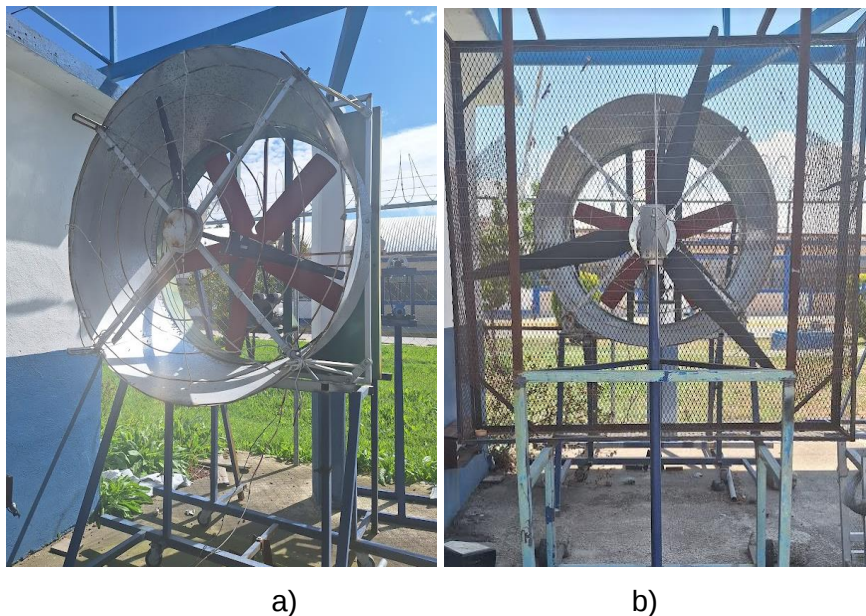
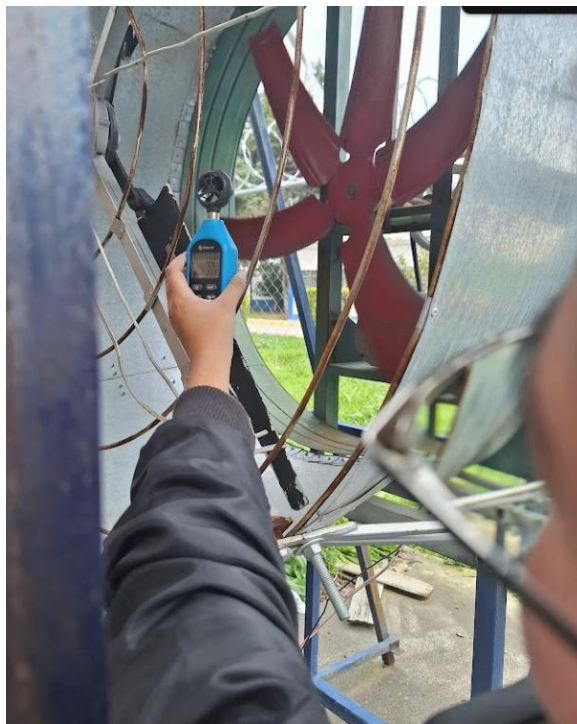


Figura 4. a) Ensamble aerogenerador-extractor, b) Instalación de segundo generador.

Antes de comenzar a realizar las mediciones de los parámetros principales, se marcan los puntos de medición donde se colocarán los instrumentos de medición para obtener los valores de velocidad de entrada y salida del extractor de aire para determinar el perfil de aire.

Se consideran 16 puntos de medición a la salida del ensamble (dividiendo la circunferencia completa en 4 anillos), para la salida del extractor se consideran 16 puntos de medición, pero con diferentes radios pues el diámetro de salida del ensamble es mayor. Las mediciones se realizan a la salida del primer aerogenerador (Figura 5a) y a la entrada del segundo aerogenerador (Figura 5b).



a)



b)

Figura 5. Medición de velocidad a) salida de primer aerogenerador y b) antes de pasar por segundo aerogenerador.

El segundo aerogenerador se instaló a diferentes distancias (20 cm – 140 cm) del ensamble extractor-aerogenerador (Figura 6 y 7) para determinar las velocidades de aire a la salida del aerogenerador 1 y a la entrada del aerogenerador 2.



Figura 6. Ensamble con resistencia a diferentes distancias.



Figura 7. Variación de distancia entre el ensamble y la resistencia de cartón.

2.2.3 Instrumentación

En cuanto a los instrumentos de medición que se emplearon durante las pruebas realizadas se enlistan los siguientes:

- Velocidad de aire: Se emplea el uso de dos tipos de anemómetros; Se utiliza el medidor digital de velocidad de aire HER-445 con las siguientes especificaciones: precisión de $0,80 - 30,00 \text{ m/s} \pm (5\% \text{ rdg} + 0,5)$ y resolución de $0,01 \text{ m/s}$; Y el anemómetro de hilo caliente GM8903 con un rango de medición de $0 \text{ a } 30 \text{ m/s}$ y una resolución de $0,1 \text{ m/s}$, $0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$

(Figura 8a).

- Corriente eléctrica: En el caso de las mediciones de corriente eléctrica y voltaje para el cálculo de la potencia eléctrica de los generadores se emplea el uso de un multímetro (Figura 9b) con un rango de medición de corriente eléctrica de 60 A hasta 1000 A, tensión cc/ca de 600 mV – 1000V/600 mV – 750 V, resistencia de 600 Ohm – 60 M Ohm, temperatura de -40°C a 1370 °C (Figura 8b).



Figura 8. Instrumentos de medición, a) anemómetros, b) multímetro.

2.2.4 Mediciones en campo

Para cada uno de los experimentos realizados se mide la velocidad de aire de salida en los puntos marcados, tomando mediciones durante por lo menos 10 segundos en cada punto (3 repeticiones), por lo que al finalizar la medición tendremos 15 valores de velocidad de salida por cada punto en cada uno de los anillos.

- Velocidad de aire a la salida del primer aerogenerador
- 1er aerogenerador estático, 2do aerogenerador en movimiento
- Ambos aerogeneradores funcionando

2.2.5 Evaluación del dispositivo extractor-doble aerogenerador

Para la evaluación se midieron, calcularon y analizaron parámetros de

velocidades de aire en diferentes puntos, voltaje, corriente eléctrica de los aerogeneradores, potencias eléctricas y eólicas.

Posteriormente comparamos los resultados obtenidos, a partir de los resultados se calculan los valores promedios de la velocidad de aire (entrada y salida), caudal y potencia eólica.

2.2.6 Parámetros de medición.

Para la evaluación se midieron y analizaron los siguientes parámetros, con los que posteriormente se calculan nuevos parámetros:

- Velocidades de aire en diferentes puntos
- Velocidad angular: aerogenerador simple y segundo aerogenerador
- Voltaje y amperaje del aerogenerador
- Potencia eléctrica del segundo aerogenerador

2.2.7 Parámetros calculados.

Por otro lado, hay parámetros que no pueden ser obtenidos a través del uso de un instrumento de medición, o bien, de un sensor, estos datos deberán ser calculados a través de los obtenidos mediante instrumentación, los cuales son los siguientes:

- ❖ Potencia eléctrica (P_e): Estadísticamente se determina: Al contar con los datos de voltaje y corriente eléctrica se puede obtener la potencia eléctrica del aerogenerador de doble rotor.

$$P_e = V * I \quad (10)$$

Donde:

P_e = Potencia eléctrica (W)

V = Voltaje (V)

I = Corriente eléctrica (A)

- ❖ Potencia eólica (P_{eol}): Una vez teniendo los datos de velocidad de aire y diámetro de las aspas del aerogenerador, se puede obtener la potencia eólica, con la siguiente formula:

$$P_{eol} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (11)$$

Donde:

ρ = densidad de aire (kg/m^3),

$A = \frac{1}{4}\pi d^2$, $\pi = 3.1416$ (Constante),

d = diámetro (m),

v = velocidad de aire (m/s).

A partir de la fórmula de potencia eólica, se considera medir la velocidad de aire a la entrada del aerogenerador en 5 puntos, desde el centro cada 10 cm, de este modo, se tendrán que medir las velocidades en los puntos marcados en la Figura 9, en total tendremos 16 velocidades de aire medidas (izquierda, derecha, superior, inferior). Se deberá obtener el área de cada anillo de la circunferencia, de la siguiente manera (Cuadro 1):

Cuadro 1. Radios y Áreas de anillos de medición

SALIDA				
Anillo	Radio		Área	
	r_i	(m)	A_i	(m ²)
4	r_4	0.74	A_4	0.77
3	r_3	0.55	A_3	0.47
2	r_2	0.39	A_2	0.30
1	r_1	0.24	A_1	0.18
0	r_0	0.10	A_0	0.03
Área total =				1.75

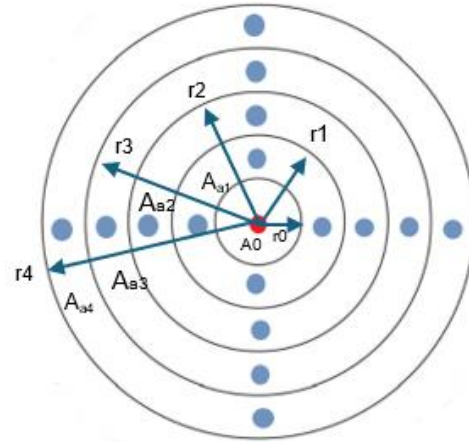


Figura 9. Puntos de medición.

$$A_{total} = \pi(r_i^2 - r_i^2); i = 1 \dots 4 \quad (12)$$

Para obtener el valor de velocidad promedio por cada anillo, se realiza de la siguiente manera (variando los valores de velocidad conforme a los valores de cada radio):

$$V_{prom} = \frac{1}{4} \sum (V_{1izq} + V_{1der} + V_{1sup} + V_{1inf}) \quad (13)$$

Donde:

V_{prom} = Velocidad promedio del anillo (m/s),

V_{1izq} = Velocidad promedio de tres mediciones del anillo 1 izquierda (m/s),

V_{1der} = Velocidad promedio de tres mediciones del anillo 1 derecha (m/s),

V_{1sup} = Velocidad promedio de tres mediciones del anillo 1 superior (m/s),

V_{1inf} = Velocidad promedio de tres mediciones del anillo 1 inferior (m/s).

Posteriormente, se deberá obtener el valor del Caudal total (Q) en cada punto:

$$Q_t = \sum_{i=1}^{n=4} (A_i * V_{iprom}) \quad (14)$$

Q_t = Caudal (m^3/s)

A_i = Área por donde pasa el aire a una cierta velocidad (m^2)

V_{iprom} = Velocidad promedio en un punto de medición (m/s)

$$P_{eol} = 0.5\rho \sum_{i=1}^{n=5} (A_i * V_{iprom}^3) \quad (15)$$

Donde:

P_{eol} = Potencia eólica (W)

ρ = densidad de aire (kg/m^3)

Una vez obtenidos los parámetros calculados se obtienen los parámetros comparables para conocer si el aerogenerador de doble rotor es más eficiente:

- Potencia eléctrica del aerogenerador simple y de doble rotor.
- Eficiencia del aerogenerador simple y de doble rotor.

Por otro lado, se cuenta con equipos de prueba que se utilizarán durante los experimentos realizados en las pruebas, los cuales son:

- Extractor
- Cono

Además, durante los tratamientos se tienen parámetros manipulables, los cuales varían durante las pruebas realizadas, son los siguientes:

- Instalación de aerogenerador simple y segundo aerogenerador.
- Distancia entre el primer aerogenerador y el segundo aerogenerador (0.20 m – 1.40 m).

2.2.8 Eficiencia

2.2.8.1 Eficacia de utilidad del extractor (η_{util})

En un invernadero para producir plántulas, la eficacia es la razón de utilizar la energía necesaria para cumplir con los objetivos determinados, tal como la potencia para mover el aire y disminuir la temperatura, o potencia de la entrada

de aire (P_{aire}) y la energía disponible antes de ésta, o bien la potencia eléctrica consumida por el motor del extractor (P_{me}).

$$\eta_{util} = \frac{P_{aire}}{P_{me}} \quad (16)$$

2.2.8.2 La eficiencia energética del extractor y aerogenerador (η_{energ})

En un invernadero para producir las plántulas, la eficiencia energética es la relación entre la suma de la potencia eléctrica del aerogenerador con de aire de la entrada al extractor ($P_{ele.generator} + P_{aire}$) y la potencia eléctrica del motor (P_{me}).

$$\eta_{energ} = \frac{P_{ele.generator} + P_{aire}}{P_{me}} \quad (17)$$

2.9 Mediciones en banco de pruebas

Durante la etapa experimental se realizaron mediciones de torque, corriente eléctrica y revoluciones por minuto del generador eléctrico en el banco de pruebas del laboratorio de electricidad con el objetivo de analizar el trabajo en el generador y determinar perdidas en el sistema, se utilizó el sensor de torque DYN-200 (Figura 10), un sensor de corriente con Arduino y un generador eléctrico de 200W el máximo de revoluciones por minuto empleado durante las pruebas fue de 2000 rpm.

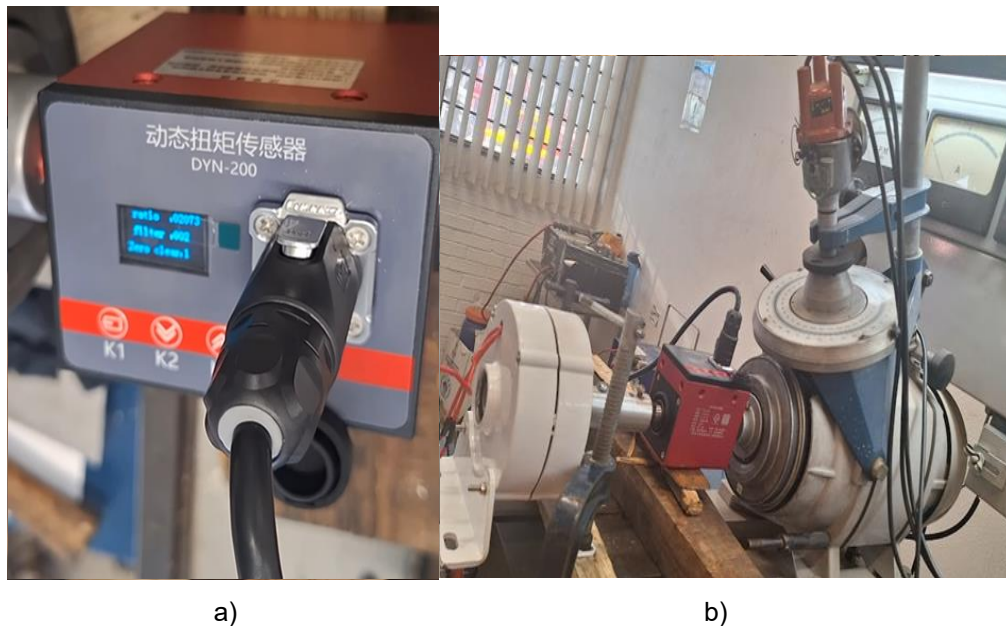


Figura 10. a) Sensor de torque, b) prueba realizada en laboratorio.

2.3 Resultados y discusiones

2.3.1 Resultados del generador eléctrico en banco de pruebas

A continuación, se muestran los resultados de las pruebas de corriente y voltaje realizadas al generador eléctrico en el banco de pruebas del laboratorio de electricidad, obteniendo un aumento de corriente y voltaje a medida que aumentan las revoluciones por minuto (Figura 11).

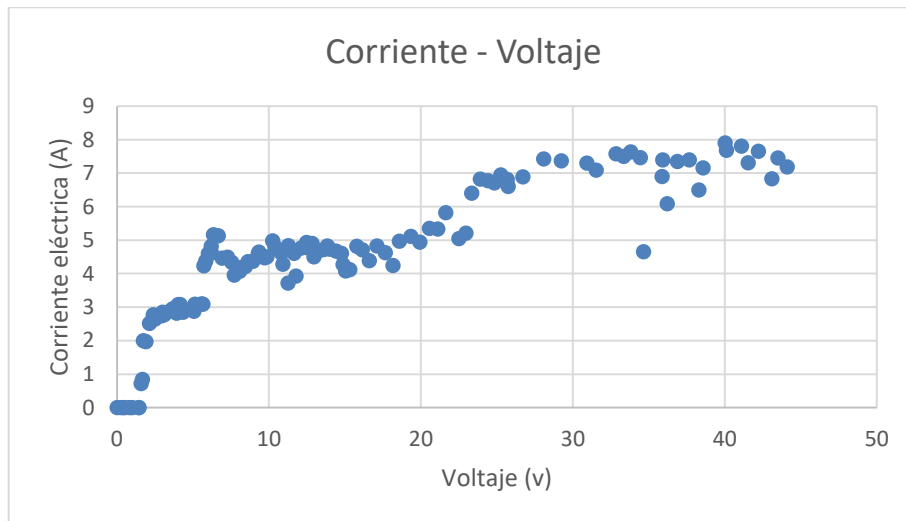


Figura 11. Relación corriente eléctrica - voltaje en función de rpm.

Con los valores de corriente eléctrica y voltaje se obtuvieron los valores de potencia eléctrica en función del aumento de revoluciones por minuto a partir de 0 rpm hasta 2000 rpm.

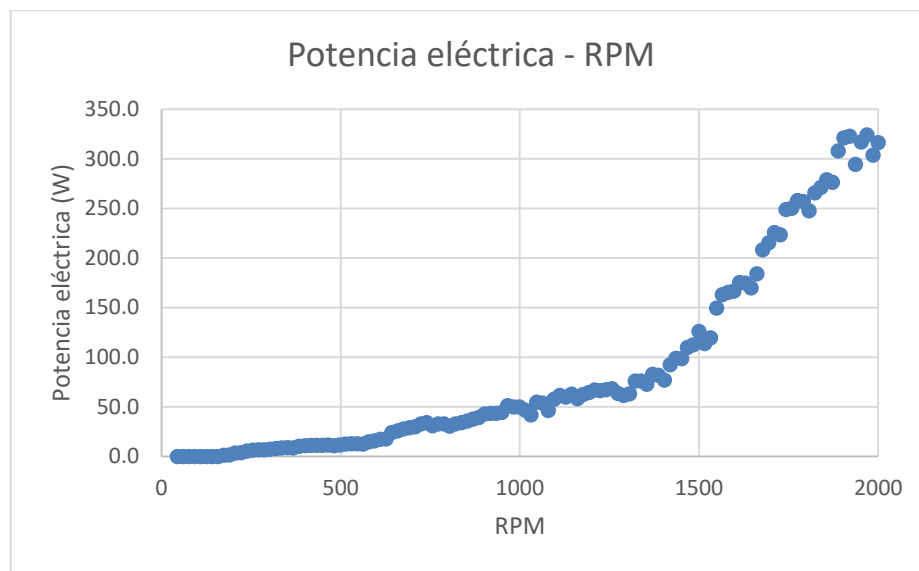


Figura 12. Potencia eléctrica en función de rpm.

En la Figura 12 se muestra la relación entre la potencia generada por el generador eléctrico y las revoluciones por minuto (0-2000rpm), se observa que la potencia eléctrica máxima obtenida con 2000 rpm es de 316.2 W.

2.3.2 Resultados de potencia eólica a la salida del primer aerogenerador

Conforme a la separación entre rotores el voltaje del segundo rotor disminuye. El punto óptimo de separación esta entre 0.20 – 0.40 m, ya que ahí el voltaje es más alto. A mayor distancia, la pérdida de energía por disipación en el aire es mayor (Figura13).

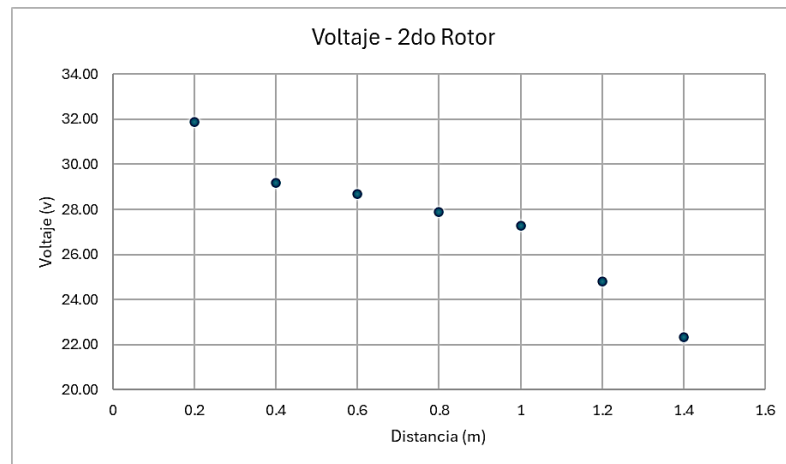


Figura 13. Incremento de voltaje con respecto a la distancia de separación entre rotores.

Se presentan los resultados del trabajo realizado para las mediciones. Las pruebas de instalación y resistencia arrojaron los siguientes resultados:

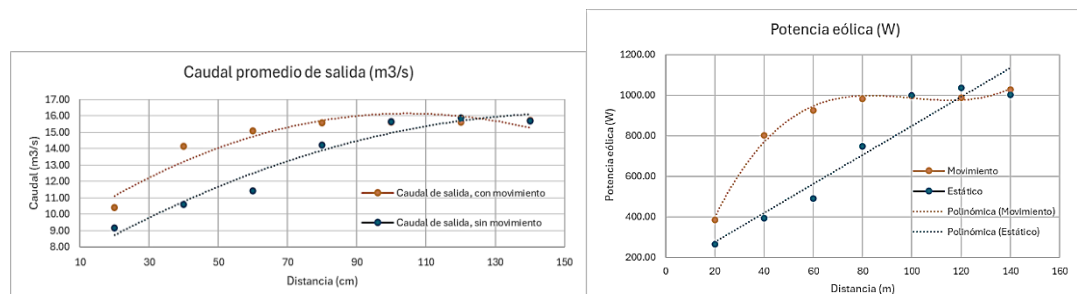


Figura 14. Resultados de la prueba del extractor con conjunto de resistencia de cono y con un aerogenerador variando la distancia de 20 a 140 cm, a) caudal medio de aire de salida (m^3/s), b) potencia eólica (W).

El caudal de aire de salida del primer rotor del aerogenerador aumenta drásticamente en $7 m^3/s$, pasando de $9 m^3/s$ a $16 m^3/s$ desde una distancia de 40 cm. De igual manera, a partir de 80 cm no se observan cambios significativos.

Al cambiar la distancia de 20 cm a 140 cm, la potencia eólica del primer aerogenerador varía de 250 W a 1000 W. En la Figura 14b, se observa que la potencia del aire después de 80 cm no muestra cambios significativos.

Además, las Figuras 14a y 14b muestran los resultados cuando las palas del primer rotor están en movimiento (puntos naranjas), es decir, cuando giran y cuando no giran (puntos azules). De esta manera, se observa que cuando las palas del primer rotor están en movimiento, se obtiene un aumento en el caudal de salida del primer rotor y también en la potencia eólica. Por lo tanto, añadir un segundo rotor permite aprovechar este caudal de salida del primero y, por lo tanto, reducir la energía eólica residual procedente del extractor de aire, primero por el conjunto de palas 1 y luego por el conjunto de palas 2.

Al analizar los datos del perfil de velocidad del aire medidos en los experimentos, se determinó lo siguiente:

- El mayor potencial eólico del extractor se concentra en dos tercios del área central del extractor, de acuerdo con las publicaciones de Terrazas et al. (2018).
- La potencia del aire de salida es mayor que la potencia del aire de entrada. Esto confirma que la potencia de salida es igual a la potencia de entrada más un empuje adicional obtenido de las palas del primer rotor (Romantchik, 2020).
- La potencia del aire de salida del extractor se disipa con la distancia, ya que la velocidad promedio disminuye a 8,5 m/s en la salida, 7 m/s a 0,5 m y 6,5 m/s a 1 m de distancia.
- La instalación de un cono en la salida del extractor, sin aerogenerador, mejoró significativamente los parámetros operativos del extractor, aumentando la potencia del aire de entrada y salida en un 7,6 %, un 13,6 % y un 21 %.
- Finalmente, la instalación de un cono en la salida del extractor y el uso de una turbina eólica ayudaron a recuperar un 16% más de energía residual en la salida del extractor, aumentando la eficiencia y la eficacia general del sistema.

El cuadro 2 presenta los principales resultados de las pruebas del conjunto extractor con cono y con uno o dos aerogeneradores, mostrando la potencia y la eficiencia presentes en el proceso de transformación de energía en un extractor, así como con la instalación de uno y dos aerogeneradores.

Cuadro 2. Resultados del experimento realizado

Distancia entre rotores (m)	Velocidad de aire pasando turbina 1 (m/s)	Velocidad de aire que llega a turbina 2 (m^3/s)	RPM 2da turbina eólica	Voltaje en 2do rotor (V)	Corriente eléctrica en 2do rotor (A)
1.4	7.45	3.01	322	22.33	2.74
1.2	7.47	3.33	332	24.79	2.81
1	7.48	3.40	338	27.27	2.85
0.8	7.49	3.50	347	28.12	2.82
0.6	7.50	3.64	394	28.84	2.95
0.4	7.51	3.71	412	29.18	2.93
0.2	7.53	3.85	447	31.87	2.94

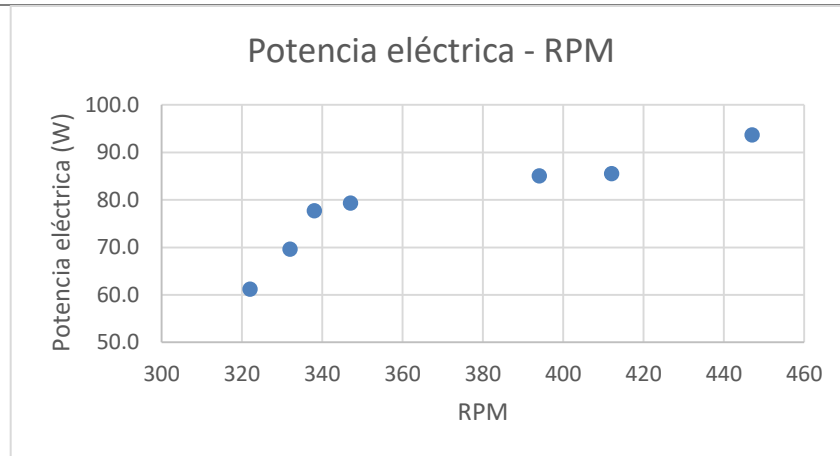


Figura 15. Relación potencia eléctrica - distancia entre aerogeneradores.

En el cuadro 2 se presentan los resultados de las pruebas realizadas al considerar una distancia de separación de entre 0.20 m a 1.40, en este cuadro se observa que, al disminuir la separación entre ambos aerogeneradores, el valor de revoluciones por minuto en el segundo aerogenerador aumenta un 37%, además nos podemos percatar que la velocidad de aire que llega al segundo aerogenerador es mayor cuando la distancia entre ambos aerogeneradores disminuye, pero aumenta solo un 27% (0.84 m/s).

Además, en la Figura 15 se presenta la relación entre la potencia eléctrica generada por el segundo aerogenerador y la distancia entre ambos aerogeneradores, se observa que en medida que la distancia entre ambos disminuye se obtiene un incremento del 53% en la potencia eléctrica generada.

2.3.3 Resultados de eficacia real del ensamble extractor-doble aerogenerador

Según los resultados presentados, un extractor operando normalmente y en condiciones óptimas tiene una eficiencia del 21%; es decir, de los 1196 W de potencia del motor eléctrico del extractor de aire, solo se transforma el 21% (251,16 W). Por otro lado, el aire de escape del extractor contiene el 42% de la energía del motor eléctrico y es mayor que la potencia de entrada debido al momento de las aspas (Romantchik et al., 2020).

De esta potencia de salida del extractor, la primera turbina eólica genera 219 W con una eficiencia del 43%, mientras que la segunda turbina eólica recupera 80 W con una eficiencia del 16%.

Los datos del cuadro 3 muestran que la instalación de una turbina eólica a la salida de un extractor de aire aumenta la eficiencia del 21 % al 38 % (*extractor + turbina 1*). Al añadir una segunda turbina eólica, la eficiencia aumenta del 38 % al 47% (*extractor + turbina 1 + turbina 2*).

Cuadro 3. Principales parámetros del conjunto extractor-aerogenerador.

	Extractor			Aerogenerador			
	Motor eléctrico	Entrada aire	Salida aire	Primero		Segundo	
Potencia,	P_{me}	P_{ae}	P_{as}	P_{g1}		P_{g2}	
W	1196±3	249±11	522±2 4	219±12		94±5	
Eficiencia	Solo extractor			Solo Ag_1	$Ext + Ag_1$	Solo Ag_2	$Ext + Ag_1 + Ag_2$
	$\frac{P_{ae}}{P_{me}}$		$\frac{P_{g1}}{P_{as}}$	$\frac{P_{g1}}{P_{n1}}$	$(\frac{P_{ae}+P_{g1}}{P_{me}})$	$\frac{P_g}{P_{n2}}$	$(\frac{P_{ae}+P_{g1}+P_{g2}}{P_{me}})$

$\eta =$						P_{me}
	0.21	0.42	0.43	0.38	0.16	0.47

P_{me} -potencia del motor eléctrico del extractor, P_{ae} – potencia de aire de entrada al extractor, P_{as} – potencia de aire de la salida del extractor, P_{g1} , P_{g2} – potencia del generador eléctrico del aerogenerador 1 y 2, Ag_1 – Aerogenerador 1, Ag_2 Aerogenerador 2.

Si bien es cierto que el aerogenerador 2 presenta una menor eficiencia (lo cual podría deberse a la distancia entre el primero y el segundo), se obtiene un buen resultado con el sistema combinado. Por lo tanto, la instalación de un segundo aerogenerador mejora la eficiencia general del sistema. Se recomienda continuar investigando un diseño único para el sistema de extracción del aerogenerador con dos rotores para su instalación en un invernadero.

2.3.4 Comparación de resultados del banco de pruebas con experimento

Conforme a los resultados obtenidos en el campo experimental y en el banco se pruebas se logra hacer una comparación entre ellos, observando que a medida que los rpm aumentan se logra obtener mayor generación de potencia eléctrica en el segundo aerogenerador (Figura 16).

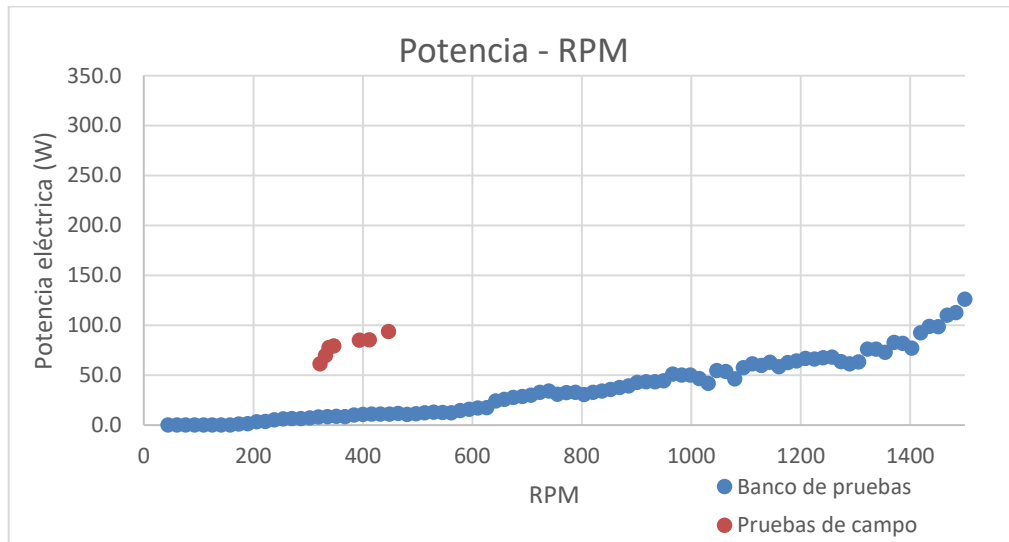


Figura 16. Comparación banco de pruebas – experimento.

2.4 Conclusiones

Del estudio se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El aire proveniente de la salida de un extractor en el invernadero sale con la suficiente velocidad, el mismo caudal con el que entra, pero mayor

potencia y es residual, es decir, toda la energía de aire se libera en la atmosfera.

- Es recomendable de reutilizar la energía de aire que sale del extractor instalando un aerogenerador, recuperando la energía del motor eléctrico del extractor.
- La cantidad máxima teórica (sin pérdidas) que se puede recuperar con el sistema extractor-doble aerogenerador es de 0.75.
- La eficacia real del sistema extractor-doble aerogenerador es de 0.47.
- La instalación del segundo rotor en un aerogenerador permite recuperar más energía y además aumentar la eficiencia del conjunto, aprovechando el aire residual para generar energía eléctrica.
- Se diseñó el equipo de un extractor con un y dos aerogeneradores evaluando así el funcionamiento del extractor con dos aerogeneradores instalados coaxialmente.
- En el banco de pruebas se alcanzaron hasta 2000 rpm con un generador eléctrico de 200 *W*, mientras que en el experimento únicamente se alcanzaron 450 rpm con un generador eléctrico de 500 *W*.
- Conforme a los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, se recomienda instalar el segundo aerogenerador (rotor) a una distancia de 0.5 a 0.7 m.

3. ANALISIS DE ARTICULOS CIENTIFICOS SOBRE DOBLE ROTOR

Ivonn Alejandra Ramírez García, Dr. Eugenio Romantchik Kriuchkova, Dr. Gilberto de Jesús López Canteñs, Dr. Eduardo Ríos Urban, Dr. Pedro Cruz Meza

Departamentos de Irrigación e Ingeniería Mecánica Agrícola (IAUIA), Universidad Autónoma Chapingo, México

3.1 Resumen

La Universidad Autónoma Chapingo recibió en el año 2023 un Título de Modelo de Utilidad No. 5280, “Ensamble de extractor-aerogenerador para aprovechamiento de aire residual y generación de energía eólica”. El ensamble mencionado tiene solo un rotor en su diseño, aunque se demostró que la implementación de un segundo rotor a una turbina eólica es una tecnología innovadora que permite recuperar más energía y utilizar una estructura común para rotores, por lo que diferentes artículos científicos y patentes han optado por utilizar dos rotores en sus investigaciones. El uso de una DRWT (turbina eólica de doble rotor) mejora el rendimiento de los aerogeneradores en comparación con una SRWT (turbina eólica de un solo rotor). El objetivo de este trabajo es revisar y analizar métodos y resultados de investigación que se han desarrollado en artículos científicos de turbinas eólicas de doble rotor lo anterior para mejorar el diseño de Título otorgado por IMPI a la Universidad Autónoma Chapingo; Las investigaciones sobre turbinas eólicas donde se implementa el uso de un segundo rotor demuestran que mejoras en el diseño de la turbina eólica que van desde el tamaño de aspas, distancias axiales y radiales entre ambos rotores, impactan directamente en su diseño. A través de diferentes métodos y técnicas de investigación tanto analíticas como experimentales en túnel de viento, reportado que se logra alcanzar aproximadamente un incremento de potencia

recuperada del 18% al 27%. Este aumento eleva la eficiencia del diseño con dos rotores, aumentando la corriente y voltaje de salida, logrando un perfil de voltaje más estable bajo distintas condiciones de carga.

Palabras clave: revisión, investigación, doble rotor, turbina, eficiencia.

3.2 Introducción

La mayoría de las turbinas eólicas utilizan un diseño en el que únicamente cuentan con un rotor de tres palas colocado en un cubo en la parte delantera de una torre de turbina (SRWT – single rotor wind turbine), siendo este el dispositivo de conversión de energía eólica más utilizado para aprovechar la energía eólica. Según la teoría de Betz, el límite del coeficiente de potencia (C_p) de un aerogenerador convencional, es decir, de un solo rotor, es 0,593 en una situación ideal (Gorban' et al., 2001). Hay varias razones importantes que causan la diferencia entre el límite teórico de Betz y la potencia máxima de salida en las pruebas de campo. Se han realizado muchos esfuerzos para mejorar el rendimiento de las turbinas eólicas convencionales investigando el diseño de las palas, aumentando el tamaño del rotor y de la torre para lograr mayores velocidades del viento a mayores altitudes.

En los DRWT, se colocan dos rotores en fila y espalda con espalda, lo que aumenta la capacidad de extracción de energía de un área de barrido fija, el concepto fue creado y desarrollado por investigadores para suministrar energía de bajo costo y aumentar la potencia de salida de las turbinas eólicas desde un área de barrido fija.

Durante los últimos años se ha propuesto un nuevo concepto de una turbina eólica de doble rotación que tiene dos rotores que giran en la misma dirección o en dirección opuesta en el mismo eje para mejorar el coeficiente de potencia máxima de una turbina eólica. Este tipo de aerogenerador está compuesto por dos rotores sobre un eje horizontal. Se distinguen según el sentido de rotación y el tamaño de las hélices de las dos turbinas, etc.

Con el objetivo de proporcionar una visión más amplia y estructurada de los avances obtenidos en las investigaciones relacionadas al estudio de turbinas eólicas con dos rotores, este artículo se centra en el análisis de artículos e investigaciones que abordan tanto el funcionamiento como la experimentación de dichas turbinas. Esta revisión se organiza considerando análisis de funcionamiento de turbinas de un rotor y dos rotores en diferentes condiciones operativas, estudios comparativos relacionados al sentido de giro de los rotores

(co-rotativo y contrarrotante), investigaciones sobre aeromecánica experimental, modelación matemática conforme al efecto aerodinámico en rotores, simulaciones con diferentes tamaños en los rotores, estudios experimentales en túnel de viento. Finalmente se discuten los avances más significativos y las áreas de oportunidad para futuras investigaciones.

3.3 Materiales y métodos

En este trabajo se ha realizado una revisión sistemática de artículos científicos orientados a la investigación y experimentación con turbinas eólicas de doble rotor, se han obtenido los artículos de bases de datos como Google Académico, Dialnet o Science Direct, utilizando las palabras clave “turbina eólica de doble rotor”, se analizan artículos científicos e investigaciones, donde se compare el funcionamiento de turbinas eólicas de un rotor con turbinas eólicas de dos rotores en diferentes configuraciones operativas, investigaciones teóricas o experimentales, con modelos matemáticos y simulaciones, analizando principalmente eficiencia, flujo y potencia en función de los diferentes diseños mediante las técnicas de investigación empleadas en los artículos científicos analizados.

Para facilitar el estudio de los artículos considerados en este trabajo se diseñó una tabla con los parámetros, objetivos, método de investigación, resultados y conclusiones en cada uno de los artículos para analizar los datos obtenidos durante la revisión y posteriormente realizar una comparación y relación de dichos artículos, con el propósito de identificar métodos empleados, tendencia de investigación, parámetros considerados en el experimento y diseño de las turbinas eólicas.

Posterior a analizar la información de cada uno de los artículos científicos, se clasifican en base a ocho resultados principales derivados de sus investigaciones, en función de los diferentes diseños mediante las técnicas de investigación empleadas en los artículos científicos analizados.

3.4 Resultados y discusión

3.4.1 Funcionamiento de DRWT y SRWT en diferentes condiciones operativas

En el 14% de las investigaciones analizadas se estudia la dinámica de un DRWT y un SRWT y se presenta una comparación del rendimiento en ambas turbinas (Davis et al., 2021), (Salah et al., 2024a). Se evalúa la capacidad de respuesta a fallas de ambas turbinas (Farahani et al., 2012) y se comparan sus respectivos desempeños en términos de referencia de potencia, respuesta a variaciones repentinas de velocidad, sensibilidad a perturbaciones frente a variaciones de parámetros de la máquina (Yahdou et al., 2017) (Hemachandira et al., 2021) mientras se emplea la técnica de contra rotación. La evaluación de esta técnica se presenta en términos de características aerodinámicas, incluidos los coeficientes de potencia y par (Didane et al., 2021), concluyendo que la disminución de la distancia entre los dos rotores conduce una mayor producción de energía aumentando la eficiencia del sistema hasta en un 4,75% (Mohammed Omar, n.d.).

El estudio comparativo además se realiza en un túnel de viento de capa límite atmosférica (ABL) a gran escala con los modelos DRWT y SRWT a escala en condiciones de estabilidad neutra (Z. Wang, Tian, & Hu, 2016), realizando análisis numéricos para dos condiciones de estabilidad atmosférica: (1) neutral y (2) estable (Kumar et al., n.d.), la precisión del modelo aerodinámico de DRWT se mejora al incluir el efecto del tubo de corriente (Farahani et al., 2012), esta prueba indica que una versión reducida del sistema de turbina de doble rotor puede producir hasta un 60% más de energía que un SRWT (Habash et al., 2010a).

La precisión del modelo aerodinámico de DRWT se mejora al incluir el efecto del tubo de corriente, se evalúa y compara la capacidad de respuesta a fallas de DRWT y SRWT (Farahani et al., 2012). Las mediciones detalladas de la estela de flujo se correlacionaron con la producción de energía y los resultados de las mediciones de la carga de viento de los modelos de turbinas eólicas para dilucidar la física subyacente para optimizar el diseño de las turbinas eólicas para un

mayor rendimiento energético y una mejor durabilidad (Ozbay et al., 2016a).

La potencia acumulada de DRWT supera en cierta medida a la SRWT bajo determinadas condiciones de funcionamiento (Chen et al., 2022). Se obtuvieron curvas de potencia, se destaca la investigación detallada del desempeño de la turbina eólica en diferentes configuraciones para explorar el beneficio y efecto de cada configuración en la potencia de salida, superando a una SRWT (Mohamed et al., 2020). Se comparó el efecto de diferentes condiciones operativas sobre la potencia extraída entre DRWT y SRWT aplicando el método de regresión múltiple a los datos empíricos para hacer coincidir las condiciones operativas variables con el modelo desarrollado mediante análisis de varianza (ANOVA) (Amoretti et al., 2023).

3.4.2 Influencia de la distancia entre rotores DRWT

En el análisis (Heteyi & Ferenc, 2020), se calculan coeficientes de potencia para diferentes configuraciones, en el caso de la turbina eólica de doble rotor, la distancia axial óptima para el desplazamiento radial de la mitad del diámetro estaba en el rango de 0,2-0,25 m de diámetro, al tener dos juegos de palas en su diseño, por lo tanto, es más eficiente para recolectar energía del viento en comparación con SRWT (Farahani et al., 2010), puede constar de subsistemas de tren impulsado desacoplados, un convertidor de triple terminal y un generador de doble rotor (Cai et al., 2024).

El coeficiente de potencia y la potencia total aumentan a medida que disminuye la separación entre rotores, lo que contribuye a la alta producción de energía de la turbina eólica de eje horizontal de doble rotor (Adeyanju, 2023). En el trabajo (Mohammed Omar, n.d.) se presentan los resultados de cálculos manuales sobre coeficiente de potencia, valores experimentales y simulaciones en función de la separación de los rotores entre 0.25 m y 3 m. Se determina que cuando la separación de los rotores es menor se tienen resultados de coeficiente de potencia más alto hasta 50%.

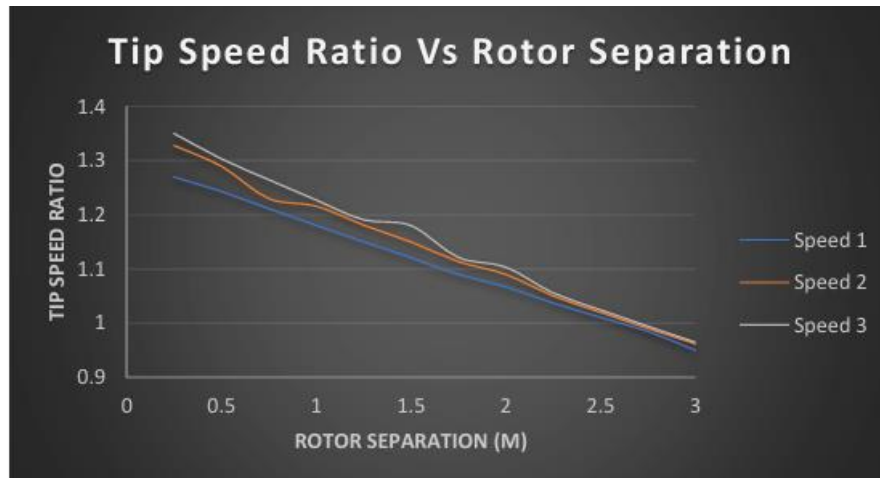


Figura 17. Relación de velocidad frente a la separación del segundo rotor.

También se determinan las velocidades de aire antes del segundo rotor sus revoluciones por minuto en función de la separación entre los dos rotores, obteniendo un aumento del 30% en la velocidad de aire, y un 25% en revoluciones por minuto (Figura 17).

Así mismo, se presenta como resultado de investigación la relación de velocidad de punta (TSR), que es la relación entre la velocidad de la punta de la pala de una turbina eólica y la velocidad del viento, observando que la relación de velocidad frente a la separación del segundo rotor, mostrando que a medida que la distancia disminuye la distancia entre los dos rotores la velocidad aumenta y por lo tanto la potencia aumenta, como resultado de una prueba experimental en el que se colocó el segundo rotor a una distancia de separación de 3m del primer rotor, en la primer velocidad hasta que se registren rpm constantes, repitiendo los pasos para las dos velocidades más y cambiando las distancias de separación de rotores de 2.75 m a 0.25 m (Mohammed Omar, n.d.).

3.4.3 Estudio comparativo de DRWT en configuración co-rotativa y contrarrotante

El 8% de las investigaciones analizadas se enfocan en comparar el sentido de giro de las turbinas eólicas de doble rotor. En la DRWT se introduce un par de amortiguación más alto tanto en el modo de velocidad constante como en el de ángulo de paso constante (Farahani et al., 2012), se comparan la potencia de

salida y las características de estela de tres DRWT diferentes con configuraciones CO-DRWT y CR-DRWT a escala real (K. Wang et al., 2022), se analiza la distribución de fuerzas aerodinámicas sobre las palas, lo que permite determinar los coeficientes de fuerza aerodinámica (Lipian et al., 2020), utilizando diferentes enfoques de movimiento giratorio (plano de mezcla, rotor congelado y malla deslizante) se examina el par de los rotores (Szlivka et al., 2023).

La eficiencia de conversión de todo el sistema puede alcanzar aproximadamente el 25% (H. Li et al., 2024), teniendo en cuenta la pérdida de eficiencia de aproximadamente el 16% en el proceso de transmisión de potencia (Kim, 2007). El estudio revela que, el generador de conmutación de flujo de imán permanente de doble rotor contrarrotante, ofrece una potencia de salida un 27,17% mayor, lo que resulta en una densidad de potencia 1,25 veces mayor con un buen factor de regulación de voltaje del 18,67% (Ullah, Khan, & Hussain, 2022b), la densidad de energía y el coeficiente de potencia de un CO-DRWT optimizado son 1.363 veces mayores que los de un SRWT (Heteyi et al., 2023), obteniendo además un aumento del 22,7 % en relación de ondulación del par y dentado, respectivamente (Ullah, Khan, & Hussain, 2022c) y en consecuencia el costo general de la máquina se reduce y ofrece excelentes capacidades de regulación de flujo (Ullah, Khan, Akuru, et al., 2022).

Aunque bien este artículo (Yu et al., 2014) presenta un novedoso motor de conmutación de flujo de doble rotor sin imán para aplicaciones de ventiladores de refrigeración de bajo costo, el motor propuesto no solo realiza la función de conmutación de flujo, sino que también acorta los devanados finales para mejorar su eficiencia operativa.

Los resultados muestran que las ventajas estructurales de una turbina eólica de doble rotor pueden reducir la tensión de los componentes clave de la caja de engranajes y aumentar la vida útil del rodamiento planetario, mejorando así la vida útil de toda la caja de engranajes y el tiempo de inactividad de toda la turbina eólica (Yang, Li, Yao, Gao, et al., 2019).

3.4.4 Estudio experimental sobre aero dinámica y características de estela en turbinas eólicas de doble rotor con sentido de giro rotante y contrarrotante.

Por otro lado, el 15% de las investigaciones analizadas presentan estudios experimentales, por ejemplo en (Mendoza et al., 2023), (Davis et al., 2023) el objetivo principal es evaluar el rendimiento aerodinámico general, las cargas de las palas y la estructura de estela de un generador de turbina eólica de referencia que opera dentro de esta configuración de turbina dual y comparar los efectos con los de la configuración típica de una sola, así como explorar características sistemáticas detalladas de varios diseños de turbinas eólicas multi rotor (Kale & Sapali, n.d.), analizar el mecanismo de operación contrarrotante sin engranajes y sin escobillas (Ullah et al., 2023), en (Hollands et al., 2020) se investigan los campos de velocidad media y de fase promediada junto con la energía cinética de turbulencia.

El mecanismo DRWT propuesto en (Islam et al., 2021) puede extraer más energía mecánica en comparación con SRWT. Luego, se analiza un diseño de turbina eólica no convencional, la CO-DRWT con un código CFD (Ferenc Szlivka, 2020) variando las distancias axiales y radiales entre las dos turbinas (Heteyi & Szlivka, 2021a),(Sutikno Priyono, n.d.) y luego se utilizan como entrada para la simulación computacional de dinámica de fluidos para determinar las características del flujo a través de los rotores (Sundararaju et al., 2017a), (Heteyi & Szlivka, 2021a), o bien se utiliza ANSYS Maxwell para optimizar todos los parámetros y realizar una copia de seguridad de ellos (Alavijeh & Mirsalim, 2020). Se indica que la eficiencia del diseño de un solo rotor es simplemente del 15%, lo que se eleva al 18,1% para la turbina eólica contrarrotante de doble rotor (Bani-Hani et al., 2019), se alcanza un coeficiente de potencia promedio correspondiente de hasta el 28% (Didane et al., 2021), con un aumento de entre el 12 y el 14 % en el coeficiente de potencia máxima (Abdel Karim et al., 2020), por otro lado, se indica que el rotor auxiliar tuvo un efecto insignificante sobre el rotor principal en términos de frecuencia dominante y fluctuaciones (Zhao, Chen, et al., 2023), se calculan y se comparan entre si (E.M.Farahani, 2011).

Además, se ha demostrado que la corriente de salida mejora en un 67,9%, aumenta el voltaje de salida a 2,01 veces y la densidad de potencia a 1,72 veces mientras mantiene la eficiencia del 90,195%. y lograr un perfil de voltaje estable con variación de carga (Ullah, Khan, & Hussain, 2022a), se descubrió que la separación más pequeña del rotor muestra la relación de velocidad punta más grande (Anthony Adeyanju, 2021).

3.4.5 Modelación matemática de turbinas eólicas conforme al efecto aerodinámico en rotores y carga eléctrica en el circuito local del generador.

De igual manera, el 8% de la literatura revisada evalúan los efectos de agregar un segundo rotor, la velocidad del viento, la distancia entre los dos rotores, el tamaño del rotor delantero y la cubierta (Jenkins et al., 2017) mediante un análisis experimental del prototipo de generador realizado en el laboratorio en un banco de pruebas de dinamómetro equipado con un sensor de par (Kutt et al., 2020), se diseñó una caja de engranajes de turbina eólica de doble rotor en CATIA que puede generar aproximadamente un 5% más de energía que el sistema de turbina eólica convencional (Sultan et al., n.d.).

Se incluyen métodos analíticos como la teoría del momento del elemento de pala (BEM) y el método de red de vórtices, así como métodos computacionales de dinámica de fluidos como las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas de Reynolds (RANS) y la simulación de grandes remolinos (LES) (Thelen et al., 2016), (A. J. Rosenberg, 2016), (Thelen et al., n.d.).

El modelo toma varios datos geométricos, como la longitud de la pala, el número de palas, la cuerda, los ángulos de torsión y la distribución de los perfiles a lo largo de la pala, se presenta una teoría BEM modificada para turbinas eólicas CR-DRWT y CO-DRWT (Bai et al., 2023) las ecuaciones de movimiento se derivan utilizando las ecuaciones de Lagrange y se linealizan aún más en un equilibrio de estado estacionario (Filsoof et al., 2018). En todos los cálculos se ha introducido el efecto del tubo de corriente en las simulaciones (Farahani et al., 2010) de las cuales se obtienen estimaciones de la desviación de las soluciones del sistema promediado de las variables lentas del sistema completo (Dosaev et al., 2021).

El modelo (Neagoe et al., 2020) utiliza las funciones cinemáticas y estáticas del multiplicador de velocidad, las características mecánicas de los rotores eólicos y del generador eléctrico, del cual se obtiene un sistema de ocho ecuaciones independientes con ocho incógnitas, de cuya solución se obtiene el punto de funcionamiento del aerogenerador. El modelo de (Yin et al., 2022) considera la reducción de la velocidad axial entre rotores y los componentes de velocidad tangencial en la estela del rotor delantero para modelar las interferencias de velocidad entre rotores para la velocidad de entrada como entrada de la teoría BEM. Se estudia un DRWT con dos rotores NREL de 5MW utilizando el modelo actual y simulaciones CFD. El resultado se calcula a partir del modelo BEM. La línea discontinua roja en la esquina muestra las configuraciones de velocidad de rotación.

Se (Beik & Al-Adsani, 2021) consideran dos esquemas de conversión para la turbina eólica, un esquema activo donde un generador de doble rotor (DRG) está conectado a un convertidor de fuente de voltaje, y un esquema pasivo donde un DRG está conectado a un generador pasivo. Se lleva a cabo un estudio paramétrico de los arcos polares del estator del rotor, teniendo como objetivo la máxima potencia generada y el par dentado mínimo, utilizando el método de elementos finitos (Selema, 2020).

3.4.6 Simulación de CDF para turbinas CO-DRWT y CR-DRWT con diferentes tamaños de rotor.

El 21% de las investigación revisadas en la literatura utiliza los empujes axiales en los rotores delantero y trasero como entrada para la simulación computacional de dinámica de fluidos para determinar las características del flujo a través de los rotores y posteriormente se desarrolla una solución general para la turbina eólica de doble rotor, que muestra que el mayor coeficiente de potencia total que se puede obtener es 0,814, ocurriendo a una distancia de separación del rotor de 2,8 veces el diámetro del rotor (Sundararaju et al., 2017b), según los resultados de la simulación, el DRWT construido puede extraer más potencia que un SRWT HAWT (Nafisa et al., 2021).

Además, mediante la utilización de un DRWT de diámetro 0,9 m y con un perfil

aerodinámico NREL S826, en (M. Mokhtar et al., 2021a) se lleva a cabo un estudio mediante el uso de dinámica de fluidos computacional, con tres enfoques: en el primero ($DR=1,5$), el diámetro del rotor trasero es menor que el del rotor delantero, en el segundo ($DR=1$), los dos rotores tienen el mismo diámetro, en el tercero ($DR=0,75$), el diámetro del rotor trasero es mayor que el diámetro del rotor delantero. Los resultados muestran que utilizar el modelo de $DR=0,75$ aumenta el CP en un 13,3% (M. Mokhtar et al., 2021b).

El objetivo principal de (Mendoza et al., 2023) es evaluar el rendimiento aerodinámico general, las cargas de las palas y la estructura de estela de un generador de turbina eólica de referencia que opera dentro de DRWT y comparar los efectos con los de la configuración típica de una sola turbina, utilizando la caja de herramientas de dinámica de fluidos computacional de código abierto OpenFOAM, o bien el uso de AeroVIEW para configuraciones de uno o varios rotores (Martín-San-Román et al., 2021).

Se obtienen grandes ahorros computacionales al utilizar con moderación las simulaciones de alta fidelidad que consumen mucho tiempo y al realizar la mayor parte de la búsqueda del espacio de diseño utilizando modelos rápidos de fidelidad variable (Thelen et al., 2018b).

La configuración de doble rotor dio como resultado un aumento promedio del 16% en la generación de energía en comparación con el rotor de tamaño completo solo (Slew et al., 2016a). El diseño propuesto en (Saeed et al., 2017) tiene un estator, dos rotores acoplados mecánicamente y dos grupos de devanados de inducido, además, el efecto de tener un rotor auxiliar a favor del viento reduce el ángulo de ataque a lo largo de la sección interior de la pala (Zhang et al., 2016), el prototipo consigue un aumento de la potencia extraída de aproximadamente un 15%, a pesar de una reducción de la relación peso/potencia de aproximadamente un 20% (Castiglione et al., 2021).

3.4.7 Estudio experimental en túnel de viento con modelos a escala sobre rendimiento aerodinámico y características de estela en CR-DRWT y CO-DRWT

En este caso el 8% de la literatura citada menciona que al realizar (Z. Wang et

al., 2018) un estudio experimental en un túnel de viento de capa límite atmosférica (ABL) con modelos de turbinas a escala para investigar el rendimiento aerodinámico y las características de estela de los DRWT en configuración CR-DRWT o CO-DRWT, comparando con los de un aerogenerador convencional de un solo rotor (Saulescu et al., 2021), se observa que el DRWT mejora el rendimiento aerodinámico de las turbinas aisladas entre un 5% y un 6% (Moghadassian et al., 2016).

El flujo complejo en el doble rotor en (Asfar & Mahasneh, 2020) se estudia mediante CDF, se investiga la separación axial entre los rotores delantero y trasero con un modelo a pequeña escala en un túnel de viento subsónico, la comparación mostró que la DRWT producía casi un 100% más de energía que el SRWT (Ozbay et al., 2014a), el máximo CP de la turbina de doble rotor es un 5% mayor que la del rotor delantero (Ai et al., 2020). Se utilizan ocho perfiles aerodinámicos diferentes para investigar los cambios en el rendimiento de la pala (Tenguria et al., 2011).

Además de medir el rendimiento de potencia de los modelos SRWT y DRWT, también se investigan las cargas de viento estáticas y dinámicas que actúan sobre los modelos de prueba (Ozbay et al., 2014b), barridos paramétricos, optimización directa mediante búsqueda de patrones, optimización basada en sustitutos (SBO) mediante modelos basados en aproximación (Thelen et al., 2018a). El estudio comparativo se realiza en un túnel de viento a gran escala con modelos DRWT y SRWT a escala montados en el mismo flujo entrante de capa límite turbulenta (Z. Wang, Tian, Ozbay, et al., 2016). Se observó que la intensidad de la turbulencia aguas abajo experimenta cambios drásticos y una recuperación lenta en comparación con su contraparte de velocidad (Lam & Peng, 2017).

Los resultados de las pruebas de rendimiento en el túnel de viento se evaluaron estadísticamente utilizando los coeficientes de correlación de Pearson y el rango de Spearman (Romański et al., 2016). Se indica que una versión reducida del sistema de DRWT puede producir hasta un 60% más de energía que un sistema de un solo rotor (Habash et al., 2010b). Los resultados muestran que, en el caso

de añadir un rotor auxiliar del mismo diámetro en un conducto, el coeficiente de potencia de la parte giratoria aumenta al 16% (Rahmatian et al., 2023).

El segundo rotor permite distribuir cargas (Lipian et al., 2019), según el investigador (Salah et al., 2024b), los resultados del experimento muestran que el DRWT tiene un efecto significativo en la eficiencia de la energía eólica, la configuración propuesta (Mohamed et al., 2019) para una DRWT con conductos demuestra un mayor rendimiento que todas las demás configuraciones para el mismo flujo de aire entrante, con un rotor adicional, la turbina eólica puede capturar más energía eólica que la SRWT (Nugroho et al., 2018). Además, en (Y. Li, 2022) se resuelve el problema de la fluctuación de voltaje causada por el convertidor en el lado del estator y el lado del rotor de la turbina eólica tradicional.

3.4.8 Simulación de par resultante, potencia aerodinámica y potencia eléctrica en MATLAB/Simulink de una CR-DRWT

Por otro lado, en el 7% de las investigaciones analizadas intenta mejorar el rendimiento del aerogenerador mediante el uso de un sistema eólico de doble rotor (Housseyn Kahal, n.d.) (Kahal et al., 2019) al incluir el efecto del tubo de corriente. La potencia aerodinámica y también la potencia eléctrica de la turbina eólica de doble rotor y co-rotación de eje único se simulan utilizando el software MATLAB/Simulink [140].

Para conseguir la máxima potencia del DRWT se utiliza la técnica de velocidad variable con seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) (Benbouhenni, 2021)(Benbouhenni & Bizon, 2021a) de imán permanente con modulación de flujo bidireccional (Y. Wang et al., 2019) o de flujo radial de doble rotor (DRRFPM) con devanados toroidales que aparentemente puede mejorar el coeficiente de utilización de la energía eólica (Xu et al., 2013), con un nuevo comando directo de potencia DPC de sistemas de energía eólica de doble rotor basados en generadores de inducción (Ai et al., 2020; Benbouhenni, Zellouma, et al., 2023). En el caso de simulaciones de dinámica de fluidos computacional (A. Rosenberg et al., 2014) se utilizan simulaciones de dinámica de fluidos computacional de Navier-Stokes promediadas por Reynolds, las simulaciones de grandes remolinos confirman el aumento del potencial de captura de energía del DRWT.

Conforme al análisis de rendimiento de las palas, que están controlados principalmente por cuatro factores, el eje de pliegue de la raíz, el eje de pliegue de la punta, el pliegue de la raíz y los ángulos de pliegue de la punta, en (Chu et al., 2023) muestran que las configuraciones de diseño doble superan a las configuraciones de SRWT.

Se utiliza el software STAR-CCM + para una simulación transitoria, basada en la tabla experimental de Taguchi, una entrada de velocidad de 8 m/s y una intensidad de turbulencia del 1% (Shen et al., 2024), o bien simulaciones con el programa ASHES, con las que se pueden comparar diseños con un rotor y 3 rotores y con una reducción de peso del 19% (García Gutiérrez, 2018), de igual manera se proponer realizar los experimentos de campo utilizando un algoritmo de control integrado (W. Cho et al., 2017).

Se analiza un diseño de turbina eólica (Heteyi & Szlivka, 2021b) CO-DRWT con un código CFD, variando las distancias axiales y radiales entre las dos turbinas, según los resultados el CO-DRWT tiene un gran potencial en la búsqueda de formas más eficientes de captación de energía eólica (Yang, Li, Yao, & Gao, 2019), se utilizó un sistema de velocimetría de imágenes de partículas digitales de alta resolución para cuantificar las características del flujo en las estelas cercanas de los modelos DRWT y SRWT (Ozbay et al., 2016b), (Ozbay et al., 2015).

Se analiza el principio de funcionamiento y el estado de funcionamiento de la máquina de doble rotor (Y. Li et al., 2021), mientras que el modelo se construye utilizando el módulo de simulación física de Simscape, (Housseyn Kahal, n.d.) usa un MPPT para controlar la velocidad de rotación y la potencia del generador. Esta herramienta también es empleada en (No et al., 2009) y además (Ertuk Ercan, n.d.) para conocer el par resultante, la potencia aerodinámica y también la potencia eléctrica de CR-DRWT son calculados con MATLAB y (Benboughenni Habib, n.d.-b) agregando un control inteligente de un sistema de energía eólica de doble rotor basado en un generador asíncrono (AG) en diferentes condiciones de trabajo.

Además, se utiliza para demostrar la efectividad de la estrategia de comando

utilizando DRWT de 1,5 MW (Benbouhenni & Bizon, 2021b) y validar el diseño de la técnica “controlador sinérgico integral para el control directo de potencia reactiva y activa” y los resultados obtenidos se comparan con el DARPC tradicional, las principales ventajas de esta técnica son la facilidad de implementación, buena respuesta dinámica, estructura simple y operación de frecuencia de conmutación constante (Benbouhenni, Bizon, Thounthong, et al., 2024a) (Benbouhenni, Bizon, Thounthong, et al., 2024b).

De igual forma se llevaron a cabo simulaciones numéricas inestables para turbinas eólicas de doble rotor de eje horizontal con y sin torre utilizando el modelo de línea de actuador (ALM) en lugar del tradicional modelo de malla ajustada al cuerpo y el modelo de turbulencia a gran escala de remolinos (LES) para mejorar la precisión numérica de la estela, con influencia directa disminuye la relación elevación -arrastre en las palas de los dos rotores en la ubicación de 0.8 y aumenta la velocidad de entrada promedio (Zhao, Zha, et al., 2023) (Lin et al., 2023).

Se sugiere utilizar la combinación de redes neuronales y control de orden fraccional para minimizar las ondulaciones de potencia reactiva y activa del sistema de turbina eólica de doble rotor de velocidad variable para controlar un generador de inducción doblemente alimentado (Benbouhenni, Colak, Bizon, et al., 2024), se sintetiza una ley de control utilizando dos tipos de controladores: PI y control de modo deslizante utilizando la modulación de ancho de pulso se realiza una simulación utilizando el software Matlab para validar la efectividad del control diseñado de 1,5 MW [146].

Se incluye un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG), la dinámica mecánica, la potencia aerodinámica y también la potencia eléctrica de CR-DRWT de eje único se simulan utilizando el software MATLAB/Simulink (Sivrioglu et al., 2018), se utiliza el análisis de ecuaciones de movimiento junto con un análisis de elementos finitos para simular el rendimiento dinámico del sistema (Tokunaga et al., 2012). Utilizando algoritmos de súper torsión sinérgica, la mejora del rendimiento minimiza especialmente el par, las ondulaciones de potencia activa y reactiva, y reduce la distorsión armónica de la corriente del estator en

comparación con la estrategia tradicional (Benbouhenni & Lemdani, 2021).

Se propone la aplicación de una estrategia de control de súper torsión retrospectiva, el diseño del controlador implica la integración de un término de algoritmo de súper torsión en la ley de control del enfoque clásico de control de retroceso, ambas máquinas se diseñan y analizan mediante el método de elementos finitos implementado en el paquete de software Flux y los parámetros de cada máquina se extraen y utilizan en un modelo Matlab que incluye las turbinas (Tudorache & Bostan, 2018).

Se presenta un método eficiente para modelar un sistema generador de turbina eólica de doble rotor y los resultados de la simulación utilizando el software WINSIM. La turbina eólica se trata como una colección de varios cuerpos rígidos, cada uno de los cuales representa, respectivamente, las palas del rotor principal y auxiliar, los ejes de alta y baja velocidad, el generador y el sistema de engranajes (Y.-M. T.-S. S.-N. J.-Y. Cho, 2004).

3.4.9 Algoritmo de control integrado que maximiza la potencia de salida de una CO-DRWT.

Por último, el 20% de la literatura muestra simulaciones de configuración de DRWT con una combinación de la teoría del momento del elemento de pala y el método del filamento de vórtice para predecir con precisión el rendimiento aerodinámico de las turbinas eólicas de eje horizontal para una configuración de rotor único o doble (Slew et al., 2016b).

Se diseña una nueva técnica de modo de deslizamiento sinérgico de potencia directa basada en una estrategia de modulación de ancho de pulso (PWM) para un generador de inducción doblemente alimentado integrado en sistemas de energía eólica de doble rotor de velocidad variable (Benbouhenni et al., 2022).

Para diseñar y evaluar el rendimiento del nuevo aerogenerador se implementa un código numérico, desarrollado por los autores y basado en la teoría del momento del elemento de la pala, después de la validación mediante mediciones experimentales encontradas en la literatura científica (Lanzafame & Messina, 2009).

Se propone un control neuronal de par directo en modo deslizante de tercer orden

(NTOSM-DTC) para una DRWT basada en un generador asíncrono, la simulación se realizó en Matlab, y los resultados obtenidos permiten evaluar las características de la técnica de control no lineal inteligente propuesta frente a la tradicional cuando la red se somete a una caída de voltaje del 20% los resultados demuestran que la estrategia sugerida redujo el valor de distorsión armónica total (Benbouhenni, 2022) (Yahdou et al., 2024). Además, se considera uno de los enfoques más simples para controlar sistemas no lineales y sistemas con un modelo impreciso, esta estrategia propuesta utilizada en este artículo es el control de modo deslizante hacia atrás (Yahdou et al., 2018).

Se desarrolla una configuración de control mejorada en modo deslizante de súper torsión (ST) para maximizar la extracción de energía durante regímenes de vientos bajos (Talpone et al., 2019). Por otro lado, (Benbouhenni, Bizon, et al., 2023) propone un nuevo control de potencia reactiva y activa directa no lineal para generadores asíncronos de doble potencia, además se presentarán las oscilaciones reducidas de las potencias activa y reactiva con la aplicación de la teoría de control sinérgico (Benbouhenni Habib, n.d.-a).

Se propone una estrategia de control de paso para controlar la velocidad del rotor y la salida del generador y se verifica su desempeño a través de la simulación no lineal acoplado para el controlador de paso de palas colectivo-rotor (Y.-M. T.-S. S.-N. J.-Y. Cho, 2005) (El Beshbichi et al., 2021), introduciendo (Bai et al., 2023) un modelo de línea de actuador y una simulación de grandes remolinos para investigar el rendimiento aerodinámico de DRWT y sus efectos, concluyendo que las frecuencias de vibración dominantes de la producción de energía para el rotor delantero de DRWT son casi las mismas que las de la turbina eólica de un solo rotor. Se encontró que la vibración general de la torre de enfriamiento aumentó de 3 mm/s a 26 mm/s (Yap et al., 2014).

Se diseña un control sinérgico terminal para un convertidor del lado del rotor de sistemas de energía eólica de doble rotor basados en generador asíncrono (Benbouhenni & Bizon, 2021c), se estudió el desempeño del método y su efectividad bajo distorsión armónica de corriente, con simulaciones realizadas en MATLAB. Se presenta un nuevo control difuso de orden fraccionario de los

sistemas de energía eólica multirrotor basados en DFIG demostrando alto rendimiento, ya que los índices de reducción de la ondulación de la potencia activa y reactiva en esta prueba se estimaron en 74,16% y 71,38% (Benbouhenni, Bizon, Mosaad, et al., 2024).

En cuadro 4 se presentan los resultados de análisis de la revisión de los artículos de acuerdo con la relación con los temas desarrollados y sus resultados.

Cuadro 4. Literatura consultada

Referencia	%	Resultado
Funcionamiento de DRWT y SRWT en diferentes condiciones operativas		
[5] [7] [14] [18] [22] [25] [35] [53] [55] [66] [74] [78] [88] [92] [99] [113] [115] [117] [118] [128] [136]	14	Se muestra un aumento en la eficiencia de las DRWT en comparación con las SRWT. Se indica que la eficiencia del diseño de un solo rotor es del 15%, lo que se eleva al 18,1% para la turbina eólica contrarrotante de doble rotor.
Influencia de la distancia entre rotores DRWT		
[9] [13] [19] [89] [90] [139]	4	Se exploró la influencia de la separación del rotor en el funcionamiento de una turbina eólica de eje horizontal de doble rotor mediante simulación e investigaciones experimentales.
Estudio comparativo de DRWT en configuración co-rotativa y contrarrotante		
[6] [13] [21] [24] [29] [34] [46] [47] [124] [138] [140] [142]	8	La fuerza aerodinámica que actúa sobre el CR-DRWT aumentó un 13,3%, el coeficiente de potencia del diseño CR-DRWT mejoró un 7,2%, en comparación con el CO-DRWT.
Estudio experimental sobre aero mecánica y características de estela en turbinas eólicas de doble rotor con sentido de giro rotante y contrarrotante		
[41] [39] [43] [44] [45] [50] [57] [60] [65] [76] [79] [81] [85] [94] [97] [98] [102] [106] [107] [111] [116] [122] [130]	15	Los sistemas eólicos con generador contra rotativo son más eficientes y tienen una mayor ratio de amplificación, en comparación con los sistemas con generadores convencionales
Modelación matemática de turbinas eólicas conforme al efecto aerodinámico en rotores y carga eléctrica en el circuito local del generador.		

[10] [12] [36] [40] [51] [52] [54] [71] [80] [87] [103] [134]	8	La turbina eólica CO-DRWT y la turbina eólica CR-DRWT tienen un mejor rendimiento en comparación con la SRWT, con un aumento que oscila entre el 12 y el 14 % en el coeficiente de potencia máxima
Simulación de CDF para turbinas CO-DRWT y CR-DRWT con diferentes tamaños de rotor.		
[3] [8] [9] [16] [20] [28] [37] [49] [54] [59] [63] [64] [67] [69] [72] [73] [77] [82] [84] [89] [90] [105] [110] [112] [120] [137] [139] [143] [144] [146] [147]	21	Según las simulaciones, la densidad de energía y el coeficiente de potencia de un CO-DRWT optimizado son 1.363 veces mayores que los de un SRWT.
Estudio experimental en túnel de viento con modelos a escala sobre rendimiento aerodinámico y características de estela en CR-DRWT y CO-DRWT		
[2] [15] [17] [19] [38] [83] [91] [95] [101] [119] [141] [149]	8	En caso de añadir un rotor auxiliar del mismo diámetro en un conducto, el coeficiente de potencia de la parte giratoria aumenta al 16% si los dos rotores tienen diámetros diferentes (el rotor delantero tiene un diámetro menor), el coeficiente de potencia aumentará hasta un 13% respecto a dos rotores del mismo diámetro.
Simulación de par resultante, potencia aerodinámica y potencia eléctrica en MATLAB/Simulink de una CR-DRWT		
[1] [11] [70] [104] [114] [125] [131] [133] [148] [150]	7	El aumento de potencia de la turbina de doble rotor depende en gran medida de la tasa de desaceleración del viento detrás del rotor delantero. El ángulo de paso de las palas del rotor delantero y trasero también tiene un papel importante en la potencia total producida por la turbina eólica de doble rotor.
Algoritmo de control integrado que maximiza la potencia de salida de una CO-DRWT.		
[4] [23] [26] [27] [30] [31] [32] [33] [42] [48] [56] [58] [61] [62] [68] [75] [86] [93] [96] [100] [108] [109] [121]	20	En comparación con una SRWT, fue posible conseguir un 42 % más de par gracias a un segundo

[123] [126] [127] [129] [132] [135] [145]	rotor. Se alcanzó un coeficiente de potencia promedio correspondiente de hasta el 28%, la densidad de energía y el coeficiente de potencia de un CO-DRWT optimizado son 1.363 veces mayores que los de un SRWT.
--	---

3.5 Conclusiones

Con un aerogenerador de doble rotor se produce de 10% hasta un 55% de potencia más en comparación a la obtenida con un aerogenerador simple, en función de la distancia de separación de los rotores, el tamaño de aspas y el diseño, por lo que el 67% de los artículos revisados demostraron un aumento en la eficiencia del aerogenerador.

Se recomienda tener un solo generador colocado de forma horizontal, con transmisión simple, tomando el segundo rotor de 25-45% de mayor tamaño que el primero, con una distancia entre ambos rotores de 0.2-0.3 de diámetro, con una configuración de giro contrarrotante.

Se debe intensificar el análisis del rendimiento del funcionamiento del conjunto de extractor + aerogenerador de la turbina eólica mediante simulaciones y pruebas experimentales.

3.6 Referencias

- Abdel Karim, H. A., El-Baz, A. R., Aziz Mahmoud, N. A., & Hamed, A. M. (2020). Numerical analysis on the performance of Dual Rotor wind turbine. *International Journal of Scientific Research and Management*, 8(03), 352–368. <https://doi.org/10.18535/IJSRM/V8I03.EC02>
- Adeyanju, A. A. (2023). The Influence Of Rotor Separation On The Performance Of A Dual-Rotor Wind Turbine. *Journal of Namibian Studies : History Politics Culture*, 35, 4684–4702. <https://doi.org/10.59670/JNS.V35I.4573>
- Ai, K., Cui, J., Wang, M., & Avital, E. (2020). Numerical modelling of a dual-rotor marine current turbine in a rectilinear tidal flow. *Ocean Engineering*, 200, 107026. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2020.107026>
- Alavijeh, M. M., & Mirsalim, M. (2020). Design and optimization of a new dual-rotor Vernier machine for wind-turbine application. *2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering, ICEE 2020*. <https://doi.org/10.1109/ICEE50131.2020.9260840>
- Amoretti, T., Huet, F., Garambois, P., & Roucoules, L. (2023). Configurable dual rotor wind turbine model based on BEM method: Co-rotating and counter-rotating comparison. *Energy Conversion and Management*, 293, 117461. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2023.117461>
- ANTHONY ADEYANJU, O. M. and K. M. (2021). *The effect of Rotor Separation on the Performance of a Dual Rotor Wind Turbine*. <https://doi.org/10.22541/au.161804520.03119592/v1>
- Asfar, K., & Mahasneh, A. (2020). Wake Patterns in a Dual-Rotor Wind Turbine. *American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FEDSM*, 3. <https://doi.org/10.1115/FEDSM2020-20157>
- Bai, H., Wang, N., & Wan, D. (2023). Numerical study of aerodynamic performance of horizontal axis dual-rotor wind turbine under atmospheric boundary layers. *Ocean Engineering*, 280, 114944. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2023.114944>
- Bani-Hani, E., Sedaghat, A., Saleh, A., Ghulom, A., Al-Rahmani, H., Al-Zamel, S., & Lopez, J. (2019). Evaluating Performance of Horizontal Axis Double Rotor Wind Turbines. *Energy Engineering*, 116(1), 26–40. <https://doi.org/10.1080/01998595.2019.12043336>
- Beik, O., & Al-Adsani, A. S. (2021). Active and Passive Control of a Dual Rotor Wind Turbine Generator for DC Grids. *IEEE Access*, 9, 1987–1995. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3047267>
- Benbouhenni, H. (2021). Application of DPC and DPC-GA to the dual-rotor wind

turbine system with DFIG. *Article in IAES International Journal of Robotics and Automation*, 10(3), 224–234. <https://doi.org/10.11591/ijra.v10i3.pp224-234>

- Benbouhenni, H. (2022). Amelioration Effectiveness of Torque and Rotor Flux Control Applied to the Asynchronous Generator for Dual-rotor Wind Turbine using Neural Third-order Sliding Mode Approaches. *International Journal of Engineering*, 35(3), 517–530. <https://doi.org/10.5829/IJE.2022.35.03C.04>
- Benbouhenni, H., & Bizon, N. (2021a). A Synergetic Sliding Mode Controller Applied to Direct Field-Oriented Control of Induction Generator-Based Variable Speed Dual-Rotor Wind Turbines. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 4437, 14(15), 4437. <https://doi.org/10.3390/EN14154437>
- Benbouhenni, H., & Bizon, N. (2021b). Advanced Direct Vector Control Method for Optimizing the Operation of a Double-Powered Induction Generator-Based Dual-Rotor Wind Turbine System. *Mathematics* 2021, Vol. 9, Page 2403, 9(19), 2403. <https://doi.org/10.3390/MATH9192403>
- Benbouhenni, H., & Bizon, N. (2021c). Terminal Synergetic Control for Direct Active and Reactive Powers in Asynchronous Generator-Based Dual-Rotor Wind Power Systems. *Electronics* 2021, Vol. 10, Page 1880, 10(16), 1880. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS10161880>
- Benbouhenni, H., Bizon, N., Colak, I., Mosaad, M. I., & Yesssef, M. (2023). Direct active and reactive powers control of double-powered asynchronous generators in multi-rotor wind power systems using modified synergetic control. *Energy Reports*, 10, 4286–4301. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2023.10.085>
- Benbouhenni, H., Bizon, N., Mosaad, M. I., Colak, I., Djilali, A. B., & Gasmi, H. (2024). Enhancement of the power quality of DFIG-based dual-rotor wind turbine systems using fractional order fuzzy controller. *Expert Systems with Applications*, 238, 121695. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2023.121695>
- Benbouhenni, H., Bizon, N., Thounthong, P., Colak, I., & Mungporn, P. (2024a). A new integral-synergetic controller for direct reactive and active powers control of a dual-rotor wind system. *Measurement and Control (United Kingdom)*, 57(2), 208–224. https://doi.org/10.1177/00202940231195117/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_00202940231195117-FIG20.JPEG
- Benbouhenni, H., Bizon, N., Thounthong, P., Colak, I., & Mungporn, P. (2024b). A new integral-synergetic controller for direct reactive and active powers control of a dual-rotor wind system. *Measurement and Control (United Kingdom)*, 57(2), 208–224. https://doi.org/10.1177/00202940231195117/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_00202940231195117-FIG20.JPEG

- Benbouhenni, H., Colak, I., Bizon, N., & Abdelkarim, E. (2024). Fractional-order neural control of a DFIG supplied by a two-level PWM inverter for dual-rotor wind turbine system. *Measurement and Control (United Kingdom)*, 57(3), 301–318.
https://doi.org/10.1177/00202940231201375/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_00202940231201375-FIG14.JPEG
- Benbouhenni, H., & Lemdani, S. (2021). Combining synergetic control and super twisting algorithm to reduce the active power undulations of doubly fed induction generator for dual-rotor wind turbine system. *Electrical Engineering and Electromechanics*, 3, 8–17. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.3.02>
- Benbouhenni, H., Mehedi, F., & Soufiane, L. (2022). New direct power synergetic-SMC technique based PWM for DFIG integrated to a variable speed dual-rotor wind power. *Automatika: Časopis Za Automatiku, Mjerenje, Elektroniku, Računarstvo i Komunikacije*, 63(4), 718–731. <https://doi.org/10.1080/00051144.2022.2065801>
- Benbouhenni, H., Zellouma, D., Bizon, N., & Colak, I. (2023). A new PI(1 +PI) controller to mitigate power ripples of a variable-speed dual-rotor wind power system using direct power control. *Energy Reports*, 10, 3580–3598. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2023.10.007>
- Benbouhenni Habib. (n.d.-a). *Synergetic control theory scheme for asynchronous generator based dual-rotor wind power* | Benbouhenni | *Journal of Electrical Engineering, Electronics, Control and Computer Science*. Retrieved April 3, 2024, from <https://jeeccs.net/index.php/journal/article/view/215>
- Benbouhenni Habib, G. H. (n.d.-b). *Intelligent Control Scheme of Asynchronous Generator-Based Dual-Rotor Wind Power System Under Different Working Conditions* | *Majlesi Journal of Energy Management*. Retrieved April 3, 2024, from <https://www.em.majlesi.info/index.php/em/article/view/494>
- Cai, W., Hu, Y., Wang, H., Yao, L., Guo, X., & Liu, J. (2024). Cross-coupling control design of a flexible dual rotor wind turbine with enhanced wind energy capture capacity. *Renewable Energy*, 220, 119629. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2023.119629>
- Castiglione, T., Barbarelli, S., Lo Zupone, G., & Bova, S. (2021). Flow-field and wake analysis of novel double-rotor open-center tidal current turbine by CFD simulations. *Ocean Engineering*, 222, 108597. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2021.108597>
- Chen, J., Yin, F., Li, X., Ye, Z., Tang, W., Shen, X., & Guo, X. (2022). Unsteady aerodynamic modelling for dual-rotor wind turbines with lifting surface method and free wake model. *Journal of Physics: Conference Series*, 2265(4), 042055. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2265/4/042055>

- Cho, W., Lee, K., Choy, I., & Back, J. (2017). Development and experimental verification of counter-rotating dual rotor/dual generator wind turbine: Generating, yawing and furling. *Renewable Energy*, 114, 644–654. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2017.06.083>
- Cho, Y.-M. T.-S. S.-N. J.-Y. (2004). Dual-rotor Wind Turbine Generator System Modeling and Simulation. *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 32(6), 87–95. <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2004.32.6.087>
- Cho, Y.-M. T.-S. S.-N. J.-Y. (2005). Performance Analysis and Pitch Control of Dual-Rotor Wind Turbine Generator System. *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 33(7), 40–50. <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2005.33.7.040>
- Chu, Y. J., Lam, H. F., & Peng, H. Y. (2023). The design of a double-fold blade wind turbine with flat-plate blade sections. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 59, 103382. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2023.103382>
- Davis, M. S., Jafarian, A., Ferdowsi, F., & Madani, M. R. (2021). Wind energy harvesting capability of a novel cascaded dual-rotor horizontal-axis wind turbine. *International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering, ICECCME 2021*. <https://doi.org/10.1109/ICECCME52200.2021.9590963>
- Davis, M. S., Madani, M. R., & Fekih, A. (2023). Computational Fluid Dynamics Modeling of a Novel 3D-Printed Dual-Rotor Cascaded Wind Turbine. *International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering, ICECCME 2023*. <https://doi.org/10.1109/ICECCME57830.2023.10252713>
- Didane, D. H., Kudam, D., Zulkafli, M. F., Mohd, S., Batcha, M. F. M., & Khalid, A. (2021). Development and Performance Investigation of a Unique Dual-rotor Savonius-type Counter-rotating Wind Turbine. *International Journal of Integrated Engineering*, 13(6), 89–98. <https://doi.org/10.30880/ijie.2021.13.06.008>
- Dosaev, M. Z., Klimina, L. A., Lokshin, B. Y., Selyutskiy, Y. D., & Shalimova, E. S. (2021). AUTOROTATION MODES OF DOUBLE-ROTOR DARRIEUS WIND TURBINE. *Mechanics of Solids*, 56(2), 250–262. <https://doi.org/10.3103/S0025654421020060/METRICS>
- El Beshbichi, O., Xing, Y., & Ong, M. C. (2021). Dynamic analysis of two-rotor wind turbine on spar-type floating platform. *Ocean Engineering*, 236, 109441. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2021.109441>
- E.M.Farahani, N. H. M. M. E. (2011). *SSR risk alleviation in dual-rotor wind turbine*

by employing genetic solutions.
https://www.researchgate.net/publication/254012426_SSR_risk_alleviation_in_dual-rotor_wind_turbine_by_employing_genetic_solutions

- Ertuk Ercan, S. S. (n.d.). *Analysis Model of a Small Scale Counter-Rotating Dual Rotor Wind Turbine with Double Rotational Generator Armature*. Retrieved April 3, 2024, from https://www.researchgate.net/publication/330182324_Analysis_Model_of_a_Small_Scale_Counter-Rotating_Dual_Rotor_Wind_Turbine_with_Double_Rotational_Generator_Armature
- Farahani, E. M., Hosseinzadeh, N., & Ektesabi, M. (2012). Comparison of fault-ride-through capability of dual and single-rotor wind turbines. *Renewable Energy*, 48, 473–481. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2012.06.010>
- Farahani, E. M., Hosseinzadeh, N., & Ektesabi, M. M. (2010). Comparison of dynamic responses of dual and single rotor wind turbines under transient conditions. *2010 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, ICSET 2010*. <https://doi.org/10.1109/ICSET.2010.5684946>
- Ferenc Szlivka, C. H. (2020). Rotor Size Optimisation of a Counter Rotating Dual Rotor Wind Turbine. *Industrial and Operational Safety*, 2. https://www.researchgate.net/publication/347524229_Rotor_Size_Optimisation_of_a_Counter_Rotating_Dual_Rotor_Wind_Turbine
- Filsoof, O. T., Hansen, M. H., Yde, A., & Zhang, X. (2018). Dynamic Modeling and Stability Analysis of a Dual-Rotor Wind Turbine. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, 6. <https://doi.org/10.1115/DETC2018-86142>
- García Gutiérrez, R. (2018). *Estudio técnico de un aerogenerador multi-rotor*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/134781>
- Habash, R. W. Y., Groza, V., & Guillemette, P. (2010a). Performance optimization of a dual-rotor wind turbine system. *EPEC 2010 - IEEE Electrical Power and Energy Conference: "Sustainable Energy for an Intelligent Grid."* <https://doi.org/10.1109/EPEC.2010.5697229>
- Habash, R. W. Y., Groza, V., & Guillemette, P. (2010b). Performance optimization of a dual-rotor wind turbine system. *EPEC 2010 - IEEE Electrical Power and Energy Conference: "Sustainable Energy for an Intelligent Grid."* <https://doi.org/10.1109/EPEC.2010.5697229>
- Hemachandira, V. S., Rajalashmi, K., & Bharani Kumar, R. (2021). Modeling and Stability Analysis of Dual Rotor Axial Flux PMG for Wind Turbine Applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1084(1), 012114. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1084/1/012114>

- Hetyei, C., & Ferenc, S. (2020). Axial Gap Optimisation of Half Diameter Shifted Counter Rotating Dual Rotor Wind Turbine. *Interdisciplinary Description of Complex Systems: INDECS*, 18(3), 389–399. <https://doi.org/10.7906/INDECS.18.3.9>
- Hetyei, C., Molnar, I., Szlivka, F., & Molnár, I. (2023). *Spatial Arrangement of a Counter-Rotating Dual Rotor Wind Turbine*. EasyChair.
- Hetyei, C., & Szlivka, F. (2021a). Counter-rotating dual rotor wind turbine layout optimisation. *Acta Polytechnica*, 61(2), 342–349. <https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0342>
- Hetyei, C., & Szlivka, F. (2021b). Counter-rotating dual rotor wind turbine layout optimisation. *Acta Polytechnica*, 61(2), 342–349. <https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0342>
- Hollands, E. O., He, C., & Gan, L. (2020). A particle image velocimetry study of dual-rotor counter-rotating wind turbine near wake. *Journal of Visualization*, 23(3), 425–435. <https://doi.org/10.1007/S12650-020-00643-0/FIGURES/8>
- Housseyn Kahal, R. T. (n.d.). *Control of a Dual Rotor Wind Turbine System: Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems*. Retrieved April 3, 2024, from https://www.researchgate.net/publication/329169360_Control_of_a_Dual_Rotor_Wind_Turbine_System_Artificial_Intelligence_in_Renewable_Energetic_Systems
- Islam, S., Tanbinul Hoque, S. M., Hazari, R., Hasan, M., & Uddin, M. (2021). Design and Simulation of a Dual Rotor Wind Turbine based PMSG System. *International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques*, 17–20. <https://doi.org/10.1109/ICREST51555.2021.9331134>
- Jenkins, P. E., Younis, A., Chen, Y., Jenkins, P. E., Younis, A., & Chen, Y. (2017). Design and Analysis of a Dual Rotor Turbine with a Shroud Using Flow Simulations. *Journal of Power and Energy Engineering*, 5(4), 25–40. <https://doi.org/10.4236/JPEE.2017.54004>
- Kahal, H., Taleb, R., Boudjema, Z., Yahdou, A., & Chabni, F. (2019). Control of a Dual Rotor Wind Turbine System. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 62, 263–269. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04789-4_29/TABLES/2
- Kale, S. A., & Sapali, S. N. (n.d.). *A review of multi-rotor wind turbine systems* *Journal of Sustainable Manufacturing and Renewable Energy A REVIEW OF MULTI-ROTOR WIND TURBINE SYSTEMS*. 2. Retrieved April 3, 2024, from <https://www.researchgate.net/publication/260407586>
- Kim, S.-J. (2007). Development of 1MW Dual-rotor Wind Turbine System. *Proceedings of the KIPE Conference*, 196–198. www.ewea.org,

- Kumar, U., Limaye, S. D., & Dingare, P. S. V. (n.d.). A Dual rotor wind turbine a technology of future. *International Journal for Research in Engineering Application & Management*. <https://doi.org/10.18231/2454-9150.2018.1465>
- Kutt, F., Blecharz, K., & Karkosinski, D. (2020). Axial-Flux Permanent-Magnet Dual-Rotor Generator for a Counter-Rotating Wind Turbine. *Energies* 2020, Vol. 13, Page 2833, 13(11), 2833. <https://doi.org/10.3390/EN13112833>
- Lam, H. F., & Peng, H. Y. (2017). Measurements of the wake characteristics of co- and counter-rotating twin H-rotor vertical axis wind turbines. *Energy*, 131, 13–26. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.05.015>
- Lanzafame, R., & Messina, M. (2009). Design and performance of a double-pitch wind turbine with non-twisted blades. *Renewable Energy*, 34(5), 1413–1420. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2008.09.004>
- Li, H., Liu, H., Gu, Y., Lin, Y., Song, J., Ding, K., Gao, Z., Hu, W., & Shu, Y. (2024). Design and control of a parallel-axis twin-rotor counter-rotating marine current turbine for the shallow sea conditions. *Renewable Energy*, 225, 120199. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2024.120199>
- Li, Y. (2022). Study of the double rotor double machine wind turbine generation system. *Energy Reports*, 8, 85–95. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2022.05.063>
- Li, Y., Zhang, J., Li, Z., Yang, P., & Wang, H. (2021). Design and verification of a novel double rotor without stator wind turbine generation system. *Energy Reports*, 7, 161–172. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2021.10.041>
- Lin, S., Cai, X., Zhang, Y., Wang, Y., & Li, D. (2023). Effect of yaw on aerodynamic performance of co-planar multi-rotor wind turbines. *Ocean Engineering*, 279, 114441. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2023.114441>
- Lipian, M., Dobrev, I., Karczewski, M., Massouh, F., & Jozwik, K. (2019). Small wind turbine augmentation: Experimental investigations of shrouded- and twin-rotor wind turbine systems. *Energy*, 186, 115855. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.115855>
- Lipian, M., Dobrev, I., Massouh, F., & Jozwik, K. (2020). Small wind turbine augmentation: Numerical investigations of shrouded- and twin-rotor wind turbines. *Energy*, 201, 117588. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.117588>
- M. Mokhtar, M., A. Abdulrahman, M., E. Abdullatif, O., & F. AbdRabbo, M. (2021a). Study The Performance of Horizontal Axis Wind Turbine using Dual Rotor System. *Engineering Research Journal (Shoubra)*, 50(1), 23–28. <https://doi.org/10.21608/ERJSH.2021.224656>

- M. Mokhtar, M., A. Abdulrahman, M., E. Abdullatif, O., & F. AbdRabbo, M. (2021b). Study The Performance of Horizontal Axis Wind Turbine using Dual Rotor System. *Engineering Research Journal - Faculty of Engineering (Shoubra)*, 50(1), 23–28. <https://doi.org/10.21608/ERJSH.2021.224656>
- Martín-San-Román, R., Benito-Cia, P., Azcona-Armendáriz, J., & Cuerva-Tejero, A. (2021). Validation of a free vortex filament wake module for the integrated simulation of multi-rotor wind turbines. *Renewable Energy*, 179, 1706–1718. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.07.147>
- Mendoza, V., Katsidoniotaki, E., Florentiades, M., Dot Fraga, J., & Dyachuk, E. (2023). Aerodynamic performance of a dual turbine concept characterized by a relatively close distance between rotors. *Wind Energy*, 26(6), 521–537. <https://doi.org/10.1002/WE.2813>
- Moghadassian, B., Rosenberg, A., & Sharma, A. (2016). Numerical Investigation of Aerodynamic Performance and Loads of a Novel Dual Rotor Wind Turbine. *Energies* 2016, Vol. 9, Page 571, 9(7), 571. <https://doi.org/10.3390/EN9070571>
- Mohamed, A., El-Baz, A., Abd-Elaziz, N., & Mostafa, A. (2019). Computational investigation of ducted dual rotor wind turbine. *NILES 2019 - Novel Intelligent and Leading Emerging Sciences Conference*, 29–33. <https://doi.org/10.1109/NILES.2019.8909321>
- Mohamed, A., El-Baz, A., Mahmoud, N., Hamed, A., & El-Kohly, A. (2020). CFD Simulation of Ducted Dual Rotor Wind Turbine for Small-Scale Applications. *ASME 2019 Gas Turbine India Conference, GTINDIA 2019*, 2. <https://doi.org/10.1115/GTINDIA2019-2326>
- Mohammed Omar. (n.d.). *Design of a Dual Rotor Wind Turbine and construction of a Testing Rig for the Dual Rotor System*. Retrieved April 3, 2024, from https://www.researchgate.net/publication/344197150_Design_of_a_Dual_Rotor_Wind_Turbine_and_construction_of_a_Testing_Rig_for_the_Dual_Rotor_System
- Nafisa, M. T., Jahan, E., & Mannan, M. A. (2021). Design and Analysis of a Grid-Tied Dual Rotor PMSG and SCIG-Based Wind Farms. *IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference, R10-HTC*, 2021-September. <https://doi.org/10.1109/R10-HTC53172.2021.9641607>
- Neagoe, M., Jaliu, C., Saulescu, R., & Simionescu, P. A. (2020). Steady-State Response of a Dual-Rotor Wind Turbine with Counter-Rotating Electric Generator and Planetary Gear Increaser. *Mechanisms and Machine Science*, 83, 106–115. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43929-3_10
- No, T. S., Kim, J. E., Moon, J. H., & Kim, S. J. (2009). Modeling, control, and simulation of dual rotor wind turbine generator system. *Renewable Energy*,

34(10), 2124–2132. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2009.01.019>

- Nugroho, S., Diana, L., Pratilastiarso, J., Giarnayoga, W. A., & Ariyanti, D. P. (2018). Computational Performance and Aerodynamic Analysis of Multisage Wind turbine with Dual Rotor. *Proceedings - 2018 International Conference on Applied Science and Technology, ICAST 2018*, 607–612. <https://doi.org/10.1109/ICAST1.2018.8751265>
- Ozbay, A., Tian, W., & Hu, H. (2014a). A comparative study of the wake characteristics behind a single-rotor wind turbine and dual-rotor wind turbines. *32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.2014-2282>
- Ozbay, A., Tian, W., & Hu, H. (2014b). An experimental investigation on the aeromechanics and near wake characteristics of dual-rotor wind turbines (DRWTS). *32nd ASME Wind Energy Symposium*. <https://doi.org/10.2514/6.2014-1085>
- Ozbay, A., Tian, W., & Hu, H. (2015). An Experimental Investigation on the Wake Characteristics and Aeromechanics of Dual-Rotor Wind Turbines. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 9. <https://doi.org/10.1115/GT2015-43805>
- Ozbay, A., Tian, W., & Hu, H. (2016a). Experimental Investigation on the Wake Characteristics and Aeromechanics of Dual-Rotor Wind Turbines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 138(4). <https://doi.org/10.1115/1.4031476/384839>
- Ozbay, A., Tian, W., & Hu, H. (2016b). Experimental Investigation on the Wake Characteristics and Aeromechanics of Dual-Rotor Wind Turbines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 138(4). <https://doi.org/10.1115/1.4031476/384839>
- Rahmatian, M. A., Hashemi Tari, P., Majidi, S., & Mojaddam, M. (2023). Experimental study of the effect of the duct on dual co-axial horizontal axis wind turbines and the effect of rotors diameter ratio and distance on increasing power coefficient. *Energy*, 284, 128664. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2023.128664>
- Romański, L., Bieniek, J., Komarnicki, P., Dębowski, M., & Detyna, J. (2016). Operational tests of a dual-rotor mini wind turbine. *Eksploatacja i Niezawodność*, 18(2), 201–209. <https://doi.org/10.17531/EIN.2016.2.7>
- Rosenberg, A. J. (2016). *A Computational Analysis of Wind Turbine and Wind Farm Aerodynamics with a Focus on Dual Rotor Wind Turbines*. <https://doi.org/10.31274/ETD-180810-5631>
- Rosenberg, A., Selvaraj, S., & Sharma, A. (2014). A Novel Dual-Rotor Turbine for

- Increased Wind Energy Capture. *Journal of Physics: Conference Series*, 524(1), 012078. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/524/1/012078>
- Saeed, M. S. R., Mohamed, E. E. M., & Sayed, M. A. (2017). Design and analysis of dual Rotor Multi-Tooth Flux Switching machine for wind power generation. *2016 18th International Middle-East Power Systems Conference, MEPCON 2016* - *Proceedings*, 499–505. <https://doi.org/10.1109/MEPCON.2016.7836937>
- Salah, D. A. H., Nosier, M. A. E. R., & Hamed, A. M. (2024a). Investigation of the performance of a horizontal-axis dual rotor wind turbine. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/S41598-024-55844-6>
- Salah, D. A. H., Nosier, M. A. E. R., & Hamed, A. M. (2024b). Investigation of the performance of a horizontal-axis dual rotor wind turbine. *Scientific Reports* 2024 14:1, 14(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55844-6>
- Saulescu, R., Neagoe, M., Jaliu, C., & Munteanu, O. (2021). A Comparative Performance Analysis of Counter-Rotating Dual-Rotor Wind Turbines with Speed-Adding Increases. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 2594, 14(9), 2594. <https://doi.org/10.3390/EN14092594>
- Selema, A. (2020). Development of a Three-Phase Dual-Rotor Magnetless Flux Switching Generator for Low Power Wind Turbines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 35(2), 828–836. <https://doi.org/10.1109/TEC.2019.2955009>
- Shen, Z., Gong, S., Xie, G., Lu, H., & Guo, W. (2024). Investigation of the effect of critical structural parameters on the aerodynamic performance of the double darrieus vertical axis wind turbine. *Energy*, 290, 130156. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2023.130156>
- Sivrioglu, S., Bolat, F. C., & Erturk, E. (2018). Modeling and Analysis of a Single Shaft Co-Rotating Dual Rotor Small Wind Turbine. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 9(9), 897–906. <http://www.iaeme.com/IJMET/index.asp897><http://www.iaeme.com/ijmet/issues.asp?JType=IJMET&VType=9&IType=9><http://www.iaeme.com/IJMET/issues.asp?JType=IJMET&VType=9&IType=8><http://www.iaeme.com/IJMET/index.asp898>
- Slew, K. L., Miller, M., Fereidooni, A., Tawagi, P., El-Hage, G., Hou, M., & Matida, E. (2016a). A Dual-Rotor Horizontal Axis Wind Turbine In-House Code (DR_HAWT). *Mathematical and Computational Approaches in Advancing Modern Science and Engineering*, 493–503. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30379-6_45
- Slew, K. L., Miller, M., Fereidooni, A., Tawagi, P., El-Hage, G., Hou, M., & Matida, E. (2016b). A Dual-Rotor Horizontal Axis Wind Turbine In-House Code

- (DR_HAWT). *Mathematical and Computational Approaches in Advancing Modern Science and Engineering*, 493–503. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30379-6_45
- Sultan, T., Pandey, M., & Gour, A. (n.d.). Gearbox Designing System of Dual Rotor Wind Turbine (DRWT)-a Technology of Future. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 3(2). Retrieved April 3, 2024, from www.ijergs.org
- Sundararaju, H., Lo, K. H., Metcalfe, R., & Wang, S. S. (2017a). Aerodynamics and CFD analysis of equal size dual-rotor wind turbine. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 9(4). <https://doi.org/10.1063/1.4999500>
- Sundararaju, H., Lo, K. H., Metcalfe, R., & Wang, S. S. (2017b). Aerodynamics and CFD analysis of equal size dual-rotor wind turbine. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 9(4). <https://doi.org/10.1063/1.4999500/285923>
- Sutikno Priyono, S. D. (n.d.). *Design and Blade Optimization of Contra Rotation Double Rotor Wind Turbine*. Retrieved April 3, 2024, from https://www.researchgate.net/publication/228900747_Design_and_Blade_Optimization_of_Contra_Rotation_Double_Rotor_Wind_Turbine
- Szlivka, F., Heteyi, C., Fekete, G., & Molnár, I. (2023). Comparison of Mixing Plane, Frozen Rotor, and Sliding Mesh Methods on a Counter-Rotating Dual-Rotor Wind Turbine. *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 8982, 13(15), 8982. <https://doi.org/10.3390/APP13158982>
- Talpone, J. I., Puleston, P. F., Cendoya, M. G., & Barrado-Rodrigo, J. A. (2019). A Dual-Stator Winding Induction Generator Based Wind-Turbine Controlled via Super-Twisting Sliding Mode. *Energies* 2019, Vol. 12, Page 4478, 12(23), 4478. <https://doi.org/10.3390/EN12234478>
- Tenguria, N., Mittal, N. D., & Ahmed, S. (2011). EVALUATION OF PERFORMANCE OF HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE BLADES BASED ON OPTIMAL ROTOR THEORY. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 5(1), 15–23. <https://doi.org/10.4090/juee.2011.v5n1.015023>
- Thelen, A., Leifsson, L., Sharma, A., & Koziel, S. (2016). Direct and surrogate-based optimization of dual-rotor wind turbines. *34th Wind Energy Symposium*. <https://doi.org/10.2514/6.2016-1265>
- Thelen, A., Leifsson, L., Sharma, A., & Koziel, S. (2018a). RANS-based design optimization of dual-rotor wind turbines. *Engineering Computations (Swansea, Wales)*, 35(1), 35–52. <https://doi.org/10.1108/EC-10-2016-0354/FULL/XML>
- Thelen, A., Leifsson, L., Sharma, A., & Koziel, S. (2018b). Variable-fidelity shape

- optimization of dual-rotor wind turbines. *Engineering Computations (Swansea, Wales)*, 35(7), 2514–2542. <https://doi.org/10.1108/EC-12-2017-0502/FULL/XML>
- Thelen, A., Sharma, A., & Bloebaum, C. (n.d.). *Surrogate-based design optimization of dual-rotor wind turbines using steady RANS equations*.
- Tokunaga, S., Yamakura, S., & Kesamaru, K. (2012). Simulation of small wind turbine generation system with dual-rotor ring winding slotless PMSG. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 132(10), 1003–1008. <https://doi.org/10.1541/IEEJIAS.132.1003>
- Tudorache, T., & Bostan, V. (2018). ANALYSIS OF A GRID TIE DUAL ROTOR COUNTER ROTATING WIND SYSTEM. *Rev. Roum. Sci. Techn.-Électrotechn. et Énerg*, 63, 151–155.
- Ullah, W., Khan, F., Akuru, U. B., Hussain, S., Yousuf, M., & Akbar, S. (2022). Design of a Low-Cost Dual Rotor Field Excited Flux Switching Generator for Wind Turbine Applications. *2022 International Conference on Electrical Machines, ICEM 2022*, 996–1002. <https://doi.org/10.1109/ICEM51905.2022.9910868>
- Ullah, W., Khan, F., & Hussain, S. (2022a). A Comparative Study of Dual Stator With Novel Dual Rotor Permanent Magnet Flux Switching Generator for Counter Rotating Wind Turbine Applications. *IEEE Access*, 10, 8243–8261. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3143166>
- Ullah, W., Khan, F., & Hussain, S. (2022b). A Novel Dual Rotor Permanent Magnet Flux Switching Generator for Counter Rotating Wind Turbine Applications. *IEEE Access*, 10, 16456–16467. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3149895>
- Ullah, W., Khan, F., & Hussain, S. (2022c). Dual mechanical port power distribution in dual rotor permanent magnet flux switching generator for counter-rotating wind turbine applications. *IET Renewable Power Generation*, 16(6), 1267–1277. <https://doi.org/10.1049/RPG2.12450>
- Ullah, W., Khan, F., Hussain, S., Yousuf, M., & Akbar, S. (2023). A Novel Dual Port Dual Rotor Wound Field Flux Switching Generator With Uniform and Non-Uniform Rotor Poles for Counter-Rotating Wind Power Generation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 38(4), 2420–2433. <https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3272520>
- Wang, K., Liu, T., Wan, Y., Ong, M. C., & Wu, T. (2022). Numerical Investigation on Aerodynamic Characteristics of Dual-Rotor Wind Turbines. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/JMSE10121887>

- Wang, Y., Niu, S., & Fu, W. (2019). A Novel Dual-Rotor Bidirectional Flux-Modulation PM Generator for Stand-Alone DC Power Supply. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(1), 818–828. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2849970>
- Wang, Z., Ozbay, A., Tian, W., & Hu, H. (2018). An experimental study on the aerodynamic performances and wake characteristics of an innovative dual-rotor wind turbine. *Energy*, 147, 94–109. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.01.020>
- Wang, Z., Tian, W., & Hu, H. (2016). An experimental study on the wake characteristics of dual-rotor wind turbines by using a stereoscopic PIV technique. *34th AIAA Applied Aerodynamics Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.2016-3128>
- Wang, Z., Tian, W., Ozbay, A., Sharma, A., & Hu, H. (2016). An experimental study on the aeromechanics and wake characteristics of a novel twin-rotor wind turbine in a turbulent boundary layer flow. *Experiments in Fluids*, 57(9), 1–17. <https://doi.org/10.1007/S00348-016-2233-6/FIGURES/14>
- Xu, P. F., Liu, X. X., Shi, K., & Du, Y. (2013). Design of Dual-Rotor Radial Flux Permanent-Magnet Generator for Wind Power Applications. *Applied Mechanics and Materials*, 416–417, 9–14. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.416-417.9>
- Yahdou, A., Boudjema, Z., Hemici, B., & Boudjema, Z. (2017). *Second order sliding mode control of a dual-rotor wind turbine system by employing a matrix converter*. <https://www.researchgate.net/publication/317216127>
- Yahdou, A., Boudjema, Z., Taleb, R., & Djilali, A. B. (2018). Backstepping Sliding Mode Control of a Dual Rotor Wind Turbine System. *Proceedings of 2018 3rd International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb, CISTEM 2018*. <https://doi.org/10.1109/CISTEM.2018.8613409>
- Yahdou, A., Djilali, A. B., Bounadja, E., & Benboughenni, H. (2024). Using neural network super-twisting sliding mode to improve power control of a dual-rotor wind turbine system in normal and unbalanced grid fault modes. *International Journal of Circuit Theory and Applications*. <https://doi.org/10.1002/CTA.3960>
- Yang, Y., Li, H., Yao, J., & Gao, W. (2019). Research on the characteristic parameters and rotor layout principle of dual-rotor horizontal axis wind turbine. *Energy*, 189, 116270. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.116270>
- Yang, Y., Li, H., Yao, J., Gao, W., & Peng, H. (2019). Analysis on the Force and Life of Gearbox in Double-Rotor Wind Turbine. *Energies* 2019, Vol. 12, Page 4220, 12(21), 4220. <https://doi.org/10.3390/EN12214220>

- Yap, H. T., Ong, Z. C., Chong, W. T., Kong, K. K., Khoo, S. Y., Ismail, Z., & Rahman, A. G. A. (2014). Design Optimisation of Shroud-augmented Dual-rotor Exhaust Air Energy Recovery Wind Turbine Generator Using Hybrid Non-destructive Evaluation Approach. *Energy Procedia*, 61, 1266–1269. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2014.11.1077>
- Yin, F. F., Chen, J. J., Li, X. K., Ye, Z. L., Tang, W., Shen, X., & Guo, X. J. (2022). A blade element momentum model for dual-rotor wind turbines considering inter-rotor velocity interferences. *Journal of Physics: Conference Series*, 2265(4), 042058. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2265/4/042058>
- Yu, C., Niu, S., Ho, S. L., & Fu, W. N. (2014). Design and analysis of a magnetless double-rotor flux switching motor for low cost application. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(11). <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2329764>
- Zhang, H., Yan, D., -, al, Lyu, J., Rieke, G. H., Lee Slew, K., Miller, M., & Matida, E. (2016). A Numerical Investigation to Identify Dimensionless Parameters for Dual-Rotor Horizontal Axis Wind Turbines. *Journal of Physics: Conference Series*, 753(10), 102006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/753/10/102006>
- Zhao, M., Chen, S., Wang, K., Wu, X., & Zha, R. (2023). Effect of the yaw angle on the aerodynamics of two tandem wind turbines by considering a dual-rotor wind turbine in front. *Ocean Engineering*, 283, 114974. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2023.114974>
- Zhao, M., Zha, R., Chen, S., Wang, K., & Wu, X. (2023). Aerodynamic Investigation of Tower Shadow Effects on the Horizontal Axial Dual-Rotor Wind Turbine. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, 5. <https://doi.org/10.1115/OMAE2023-108147>

4. ANÁLISIS DE PATENTES DE DISEÑO Y SISTEMAS DE DOBLE ROTOR

Ing. Ivonn Alejandra Ramírez García, Dr. Eugenio Romantchik Kriuchkova, Dr. Gilberto de Jesús López Canteñs, Dr. Eduardo Ríos Urbán, Dr. Pedro Cruz Meza

4.1 Resumen

La Universidad Autónoma Chapingo recibió en el año 2023 un Título de Modelo de Utilidad No. 5280, “Ensamble de extractor-aerogenerador para aprovechamiento de aire residual y generación de energía eólica”. El ensamble patentado tiene un solo rotor, pero en el último tiempo en los diseños de los aerogeneradores para mejorar su eficiencia se ha implementado un segundo rotor, lo cual es una tecnología innovadora que permite recuperar más energía y utilizar una estructura común para rotores. El uso de una DRWT (dual rotor wind turbine “turbina eólica de doble rotor”) mejora el rendimiento de los aerogeneradores. El objetivo de este trabajo es revisar y analizar los esquemas y diseños de los aerogeneradores de doble rotor que se han desarrollado en las diferentes empresas y publicados en los patentes de turbinas eólicas de doble rotor, considerando las diferencias entre cada uno de los diseños encontrados en las patentes. Lo anterior para mejorar el diseño de Título otorgado por IMPI.

Palabras clave: aerogenerador, doble rotor, eje horizontal, energía eólica.

Tesis de Maestría en Ingeniería. Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Ing. Ivonn Alejandra Ramirez Garcia.

Director de tesis. Dr. Eugenio Romantchik Kriuchkova.

4.2 Introducción

La energía eólica es un tipo de energía renovable con enormes reservas y distribución a nivel mundial. La tecnología de turbinas eólicas es una tecnología energética interesante en la perspectiva de la lucha contra el calentamiento global.

Durante 2014, México incorporó 633,7 MW de nueva energía eólica a la red eléctrica del país, elevando la capacidad total a 2.551 MW repartidos en 31 parques eólicos y 1.200 turbinas ubicadas en Oaxaca, Baja California, Chiapas, Jalisco, Tamaulipas, San Luis Potosí y Nuevo León. regiones. El mayor ritmo de crecimiento respecto a 2013 se debió a la instalación de casi la totalidad de los proyectos eólicos del primer programa de “temporada abierta” en Oaxaca, así como un aumento de instalaciones en otros Estados.

La mayoría de las turbinas eólicas utilizan un diseño SRWT (Single Rotor Wind Turbine – Turbina eólica de un solo rotor), con un rotor de tres palas colocado en un cubo en la parte delantera de una torre de turbina (Figura 17a y 17b). Se han realizado muchos esfuerzos para mejorar el rendimiento de las turbinas eólicas de un solo rotor investigando el diseño de las palas, aumentando el tamaño del rotor y de la torre para lograr mayores velocidades del viento a mayores altitudes. La turbina eólica de un solo rotor y eje horizontal (SRWT) es el dispositivo de conversión de energía eólica más utilizado. Según la teoría de Betz, el límite del coeficiente de potencia (C_p) de un aerogenerador mono rotor (SRWT) es 0,593 en una situación ideal. Sin embargo, para un aerogenerador eólico de eje horizontal típico a escala de servicios públicos, se midió que el coeficiente de potencia máxima (C_p) estaba en el rango de 0,45 a 0,50 en mediciones de campo.

Hay varias razones importantes que causan la diferencia entre el límite teórico de Betz y la potencia máxima de salida en las pruebas de campo, y una de las cuales son las pérdidas de flujo incurridas en las regiones de la raíz de la pala.

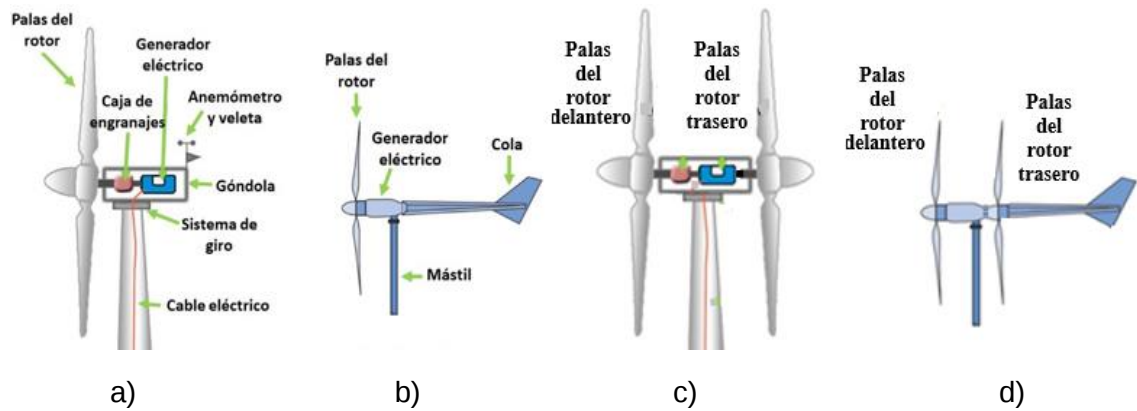


Figura 18. Esquemas de aerogenerador a) y c) industrial; b) y d) con una a), b) doméstico; con una a) y b) o dos c) y d) turbinas.

Se ha propuesto como nuevo concepto una turbina eólica de doble rotación que tiene dos rotores (Figura 18cz y 18d) que giran en la misma dirección o en dirección opuesta para mejorar el coeficiente de potencia máxima de una turbina eólica.

El concepto de DRWT fue creado y desarrollado por investigadores para equilibrar fuerzas de peso, torques, aumentar la potencia de salida de las turbinas eólicas y suministrar energía de bajo costo y desde un área de barrido fija.

En una torre se colocan una góndola y dos rotores (turbinas, hélices) en sus ejes (Figura 18c), lo que aumenta la capacidad de extracción de energía de un área de barrido fija.

Existen varios tipos de aerogeneradores de doble rotor; se distinguen según el sentido de rotación y el tamaño de las hélices de las dos turbinas, etc. El aerogenerador de doble rotor es un producto que no está disponible comercialmente a pesar de que estudios demuestran que es por lo menos un 9% más eficiente que los modelos de un solo rotor, por lo que se debe realizar un estudio, pero algunas empresas presentan los prototipos.



a) (Lillian, 2017)



b) (Group, 2023)



c) (Freedom, 2022)



d) (Murray-Smith, 2023)



e) (Sujánova, 2022)

Figura 19. Ejemplos de aplicación de doble rotor en aerogeneradores.

De esa manera se observa en la Figura 19a) el diseño de turbina presentador por North American Wind Power, mismo que utiliza dos rotores de 5 MW, de igual diámetro y con un desplazamiento de 30 grados, que será distribuido a nivel mundial; Una compañía estatal china ha empezado las pruebas de una turbina de 2,7 MW del prototipo de aerogenerador con doble rotor Huaneng Group Omicron para lograr un incremento en la eficiencia y un 10% menos de coste (Figura 19b).

Se han implementado turbinas eólicas de diseño ruso con dos rotores que proporcionan una mayor producción de energía que la de los aerogeneradores convencionales, funcionando con un sentido corrotante del que se obtiene un resultado excepcional, no se crea infrasonido y además son seguros para las aves (Figura 19c y 19d). La compañía InS se formó sobre la base de Voronezh Oficina de Diseño Experimental de la Construcción de Motores (OKBM), para usar un diseño de dos rotores para una turbina eólica propuesto por Anatoly Georgievich Bakanov, diseñador general de InS, en el que se propone un diseño

con un total de palas es nueve: cuatro están en un rotor y cinco en el otro, y los rotores giran en diferentes direcciones y el infrasonido dañino no ocurre (Figura 19e), el objetivo de esta investigación es analizar los diseños de las patentes de turbinas de doble rotor, funcionamiento y detalles considerando las diferencias entre cada uno de los diseños encontrados en las patentes, la segunda parte será el análisis de los trabajos de investigación.

4.3 Materiales y métodos

Para realizar un análisis técnico y estadístico entre los diferentes tipos de diseño se revisaron 85 patentes relacionadas al tema de diferentes países principales: China, USA, Rusia y México.

Se agruparon las patentes conforme al lugar de procedencia (Figura 20). Durante el proceso de revisión y análisis se desarrolló una tabla que presenta las características de las patentes, destacando los siguientes elementos:

- Sentido de giro: Contrarrotante, Corrotante o Ambos
- Tamaño de las aspas del aerogenerador
- Posición y distancia entre rotores
- Tipo de transmisión: Directa o Semidirecta, etc.
- Número de ejes y cajas de cambio.
- Cantidad, tipo y posición de generadores
- Número de rotores y estatores
- Tipo de control

Se diseñó una tabla con los parámetros, año de publicación, resultados y conclusiones en cada uno de los artículos para analizar los datos obtenidos durante la revisión y realizar una comparación.

4.4 Resultados y discusión

4.4.1 Cantidad de patentes lugar de procedencia

De 85 patentes revisadas, se observa que China tiene la mayor cantidad registrada, seguido de Estados Unidos, por otro lado, Corea, Australia, Japón y Dinamarca son los países con menor cantidad de patentes registradas (Cuadro 5).

Cuadro 5. Clasificación de patentes por país

País	
China	51
Estados Unidos	17
Rusia	3
Corea	1
Reino Unido	4
Australia	1
Francia	2
Japón	1
Alemania	2
México	2
Dinamarca	1

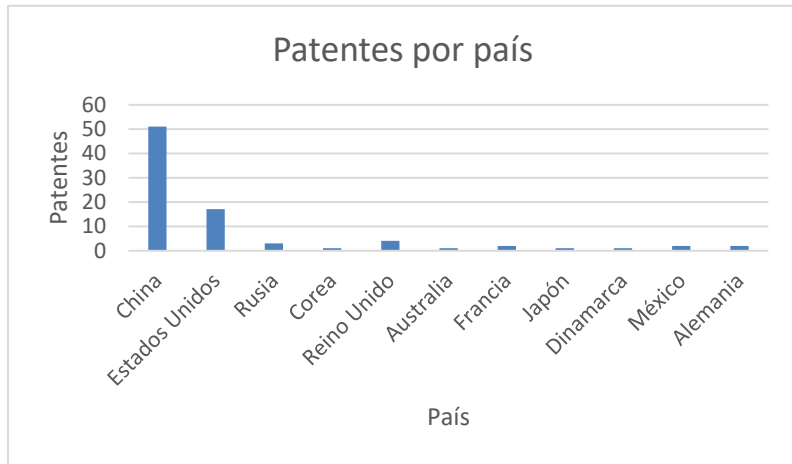


Figura 20. Patentes por país.

4.4.2 Resultado de comparación de patentes

Se revisan diseños y esquemas en 85 patentes de aerogenerador de doble rotor de las cuales se considera: el tamaño y sentido de giro de aspas, transmisión: cajas de cambio y ejes entre aspas y generadores, ubicación y cantidad de generadores, cantidad de rotores y estatores en generadores, y control de velocidad y posición de aspas.

Sentido de giro.

Conforme a las patentes encontradas y revisadas se tiene que: Contrarrotante, Rotante o Ambos (Figura 21).

- 18 patentes con sentido de giro de las palas del aerogenerador rotante (Figura 21a),
- 59 proponen un sentido de giro contra rotatorio (Figura 21b),
- 6 patentes se puede configurar el cambio de dirección del giro (Figura 21c), y
- 2 no especifican el sentido de giro.

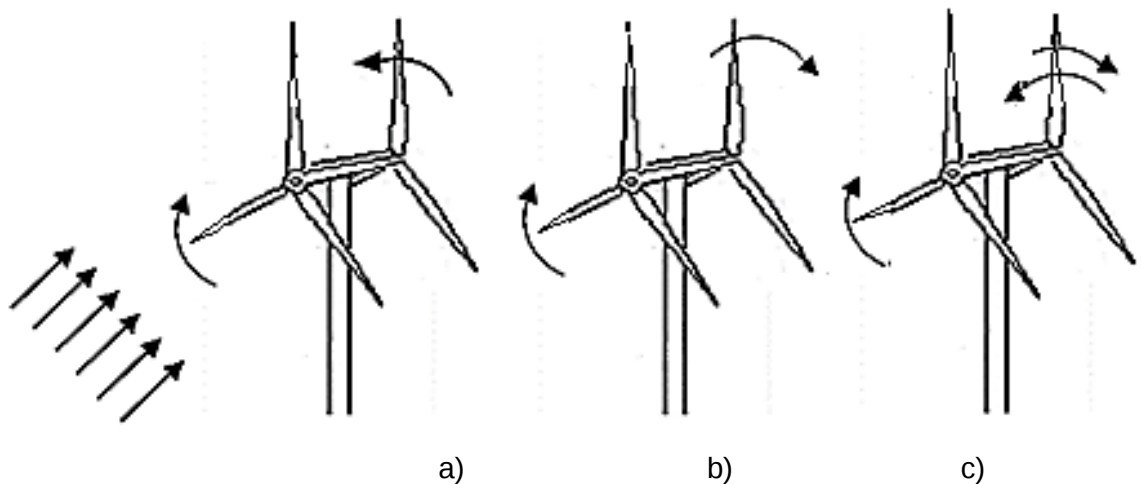


Figura 21. Sentido de giro a) contrarrotante, b) rotante, c) doble.

De diámetro de las aspas de ambos rotores

Dentro de las 85 patentes, se aprecia que en 56 patentes los diámetros de ambas palas del aerogenerador son diferentes (Figura 22a, c), mientras que en 29 son del mismo tamaño (Figura 22b).

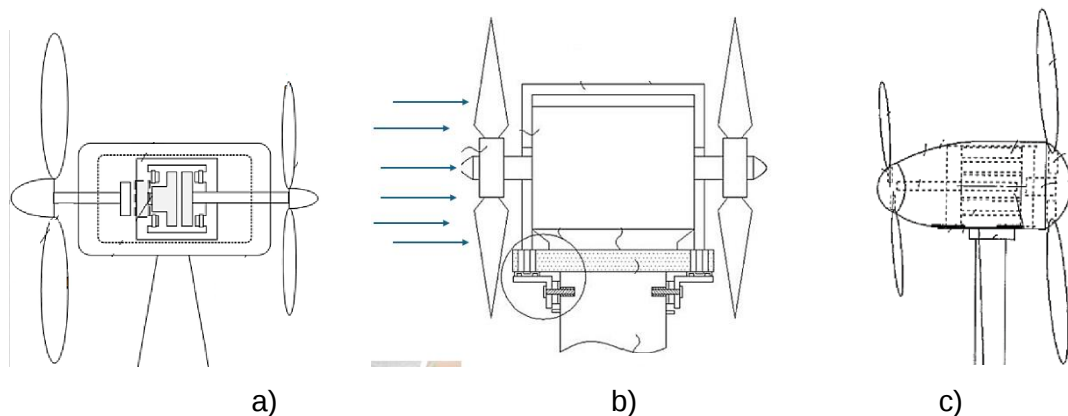


Figura 22. Tamaño de las aspas del generador a) mismo tamaño, b) primeras más pequeñas, c) primeras más grandes.

En las patentes está especialmente aportado la relación entre el tamaño de las palas del primer rotor y el segundo. El primer rotor tiene palas cuya longitud está menor y es de rango del 75 al 100 por ciento de la longitud de las palas del segundo rotor. La longitud de las palas del primer rotor es de aproximadamente el 90% de la longitud de las palas del segundo rotor [GB2347178A] (Figura 23).

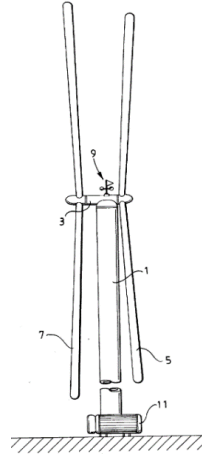


Figura 23. Patente GB2347178A.

Conforme a CN112696310A, el diámetro de las palas puede ser de 20 a 300 metros y la relación entre el diámetro de la rueda de viento delantera y la rueda de viento trasera es de 0,1 a 1[20]. Además, en CN114576081A la longitud de la pala trasera es del 60% al 80% de la longitud de la pala delantera [21].

Distancia entre ambos juegos de aspas

La distancia horizontal entre las palas del primer rotor y las del segundo rotor puede tener diferentes valores en diferentes patentes variando de 5 hasta 20 m entre los rotores eólicos [47], en [17, 21, 27, 34] se diseña con una distancia de 0.25-0.3 veces el diámetro de la rueda de viento delantera.

En la Figura 24 se muestra cómo es que puede variar la separación de ambos juegos de aspas conforme a las necesidades del diseño, en los tres incisos se muestra una separación diferente.

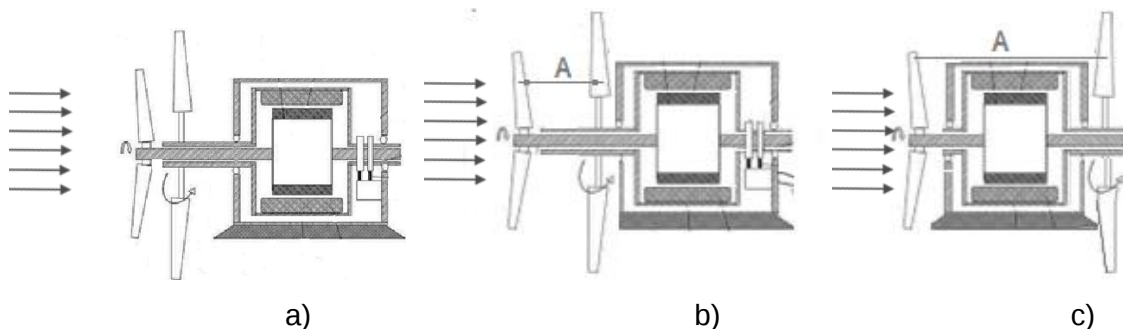


Figura 24. Distancia horizontal entre las aspas, a) separación corta, b) separación más grande, c) lado opuesto del generador.

Posición

Por otro lado, un dato importante del diseño es la posición en la que se encuentran ubicadas ambas juegos de aspas, ya sea del mismo lado del generador o bien del lado opuesto del generador (Figura 25); De este modo, en 22 diseños se colocan las palas del aerogenerador en el mismo lado del generador, en 46 patentes las palas se ubican en lugares opuestas y en 9 diseños no se especifica.

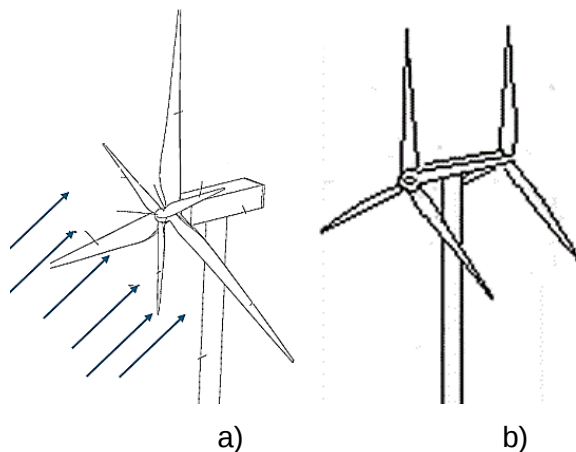


Figura 25. Posición de aspas, a) mismo lado del generador, b) lado opuesto del generador.

El espesor de la pala trasera se vuelve gradualmente más delgado a lo largo de la dirección desde la raíz de la pala hasta la punta de la pala. Las palas tienen forma de ala, las aletas se extienden hacia el eje vertical, las aletas son triangulares, la sección transversal es aerodinámica y tiene un ángulo de 15 a 30 grados con la pala [62].

Transmisión

Un aspecto fundamental que determina el rendimiento de un aerogenerador de doble rotor es el sistema de transmisión. La transmisión juega un papel muy importante en la conversión de la energía mecánica generada por los rotores en energía eléctrica utilizable. En este contexto, el diseño específico de los rotores y su disposición puede afectar significativamente la eficiencia del sistema de transmisión, lo que a su vez impacta la producción total de energía del aerogenerador (Figura 26).

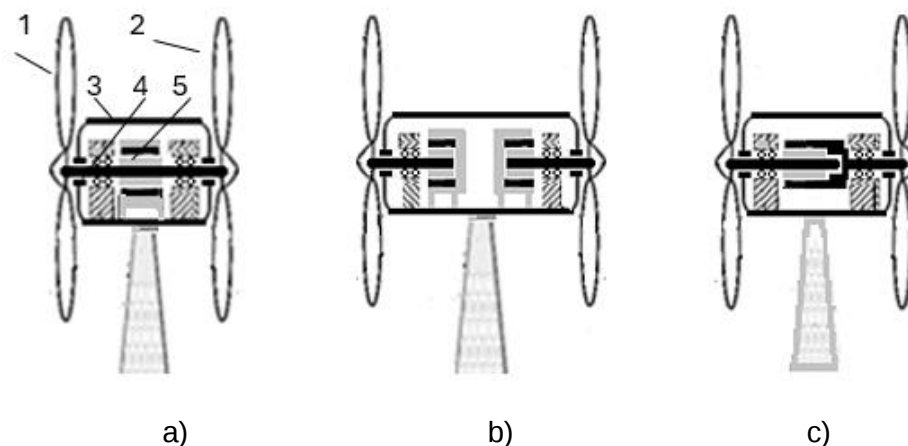


Figura 26. Transmisión del aerogenerador con dos turbinas y a) un generador, b) dos generadores, y c) un generador con dos rotores (interno y externo) sin estator, (1 y 2 – turbinas, 3 - góndola, 4 – eje, 5 – generador).

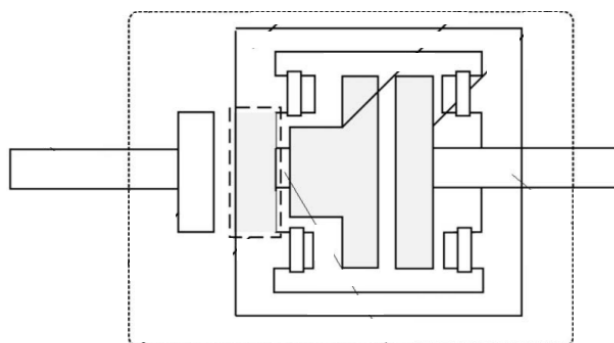


Figura 27. CN117013776, ejemplo de aplicación (1 eje principal).

En el 70% de los diseños se propone que la estructura del aerogenerador cuente con 1 eje principal [3-7, 10, 14, 15, 17-23, 25, 27, 28, 30, 33, 34, 36-38, 40-45, 47-50, 53, 55-63, 65-69, 71, 73-78, 82, 84, 85] se observa un diseño con un solo eje principal c) y b), por otro lado, únicamente en el 30% de las patentes se observa un diseño con dos ejes principales [1, 2, 8, 9, 11-13, 16, 24, 26, 29, 31, 32, 35, 39, 46, 51, 52, 54, 64, 70, 72, 79-81, 83] (Figura 27).

En tanto al tipo de transmisión en 70% de las patentes se implementa una caja de cambios con tres engranajes planetarios (Figura 28a), o con engranes magnéticos (Figura 29b).

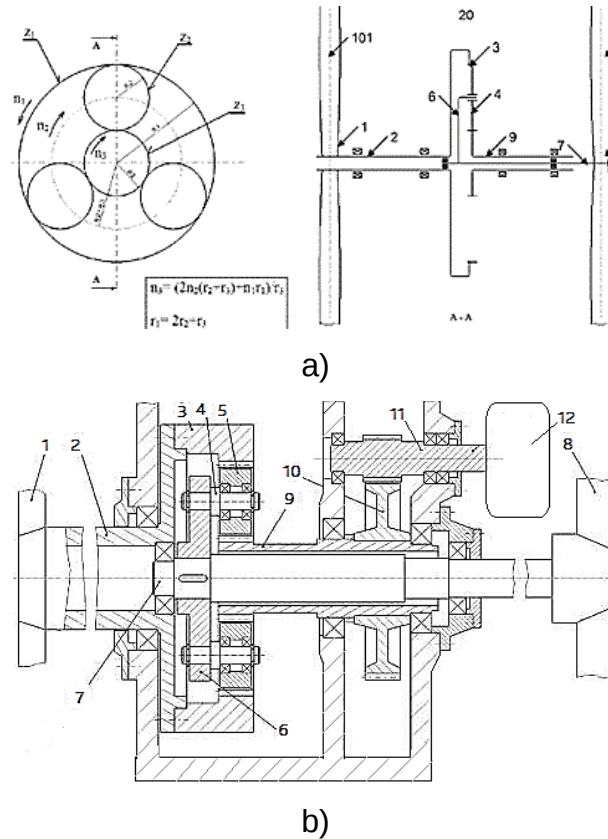


Figura 28. Ejemplos de tipo de transmisión, a) engranajes planetarios, b) engranes magnéticos.

La función de aumento de velocidad se logra mediante transmisión sin contacto sin necesidad de una caja de cambios mecánica, es decir, accionamiento directo. El accionamiento de las primeras aspas es directo, mientras que las segundas aspas son semi directo y viceversa, o semi directo en ambas palas. Por lo que, en algunos casos no se cuenta con cajas de cambios [1, 7-9, 13, 15, 16, 23-28, 30, 32-34, 36-38, 45, 49, 51, 54, 55, 58, 59], dos cajas de cambios [2, 11, 14, 20, 22, 35, 43, 49, 52, 81] o solo una caja de cambios [3-6, 17, 21, 29, 39, 40, 46, 47, 50, 60, 61, 64, 68, 83].

En otros dos casos, se utiliza una cadena de transmisión para transferir energía mecánica [10, 20, 22, 29, 50], de igual manera se ocupa un sistema que detecta la dirección del viento y transmite la señal de dirección del viento al motor de guiñada [6, 20, 26, 28, 40, 41, 47], o bien transmisión de potencia sin escobillas [58, 60, 62], en 11 patentes se implementa una caja de cambios con tres engranajes planetarios y 11 con engranes magnéticos; En otros dos casos, se

utilizan engranajes cónicos [31, 73].

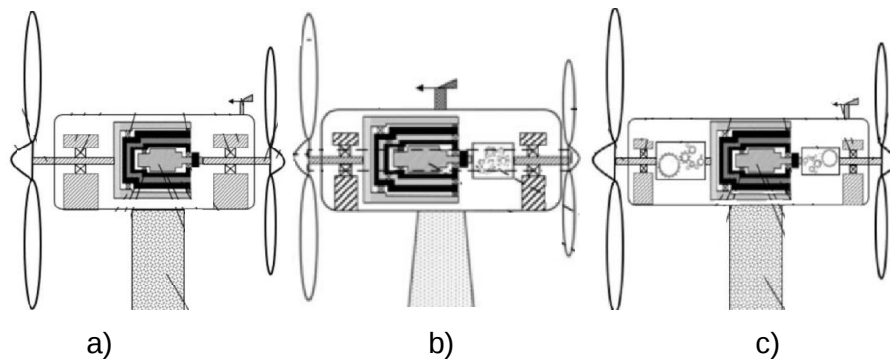


Figura 29. Aerogenerador de doble rotor con generador compuesto y transmisión a) sin cajas, b) con una caja, c) con dos cajas

Cantidad y ubicación de los generadores

La cantidad de generadores en un aerogenerador de doble rotor es un rasgo importante que impacta en la eficiencia, la fiabilidad y el costo del sistema, así como su capacidad para adaptarse a diferentes condiciones de viento, como se muestra en la 29. En cuanto a la cantidad de generadores en los diseños consultados el 89% de ellos utilizan un solo generador (Figura 30b), mientras que el 11% restante emplea el uso de dos generadores (Figura 30a).

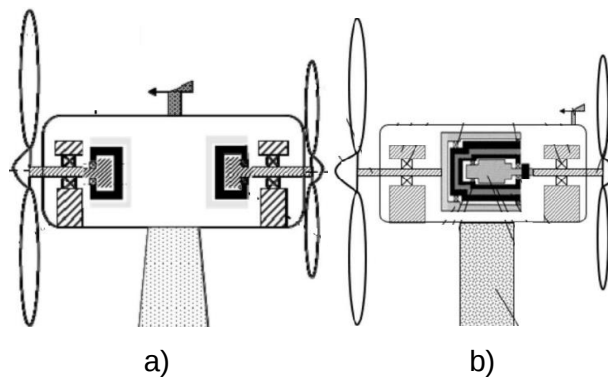


Figura 30. Aerogenerador a) dos generadores, b) un generador.

En la patente CN114776518A (Figura 30a) se utilizan dos generadores completamente independientes donde el rotor del primer generador está conectado a la rueda eólica delantera mediante el eje principal delantero, por lo que la rueda eólica trasera está conectada al rotor del segundo generador a través del eje principal trasero, lo que ahorra las cajas de cambios, tanto delantera como trasera, reduce además la dificultad y el costo de mantenimiento

de la unidad y mejora la eficiencia de generación de energía de la unidad.

Otra característica relevante para tomar en cuenta de los diseños es la ubicación del generador, se tienen dos opciones, en la góndola o base de la torre (Figura 31), por lo que en el 72% de los esquemas se observa que el generador se encuentra en la góndola, el 22% tienen el generador en la base de la torre, por otro lado, el 9% de las patentes no especifica la ubicación del generador. Ejemplo de esto, es en la patente CN104295442A, donde el par eje horizontal se transmite al eje vertical a través de un conjunto de dirección.

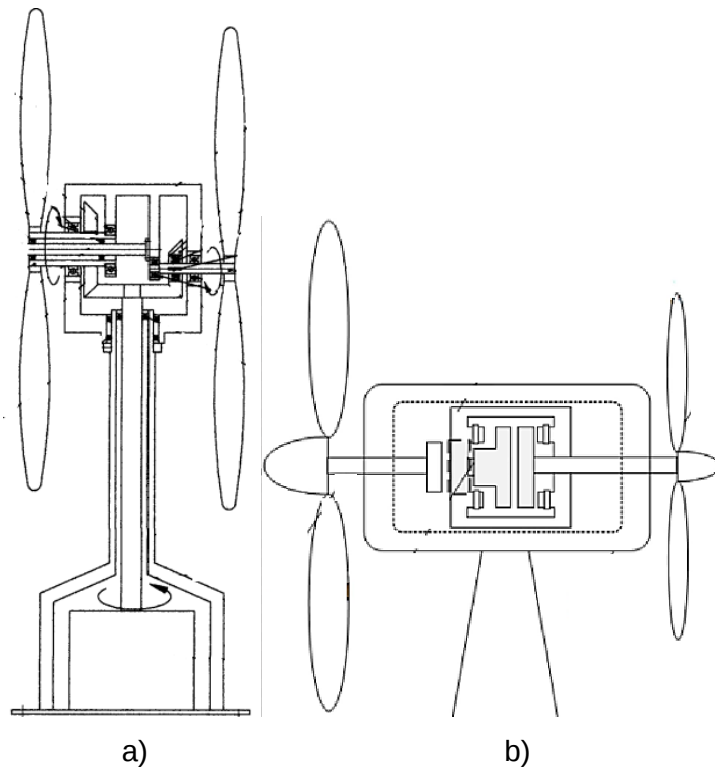


Figura 31. Ubicación del generador a) vertical, b) horizontal.

Número de palas

Evaluar cuántas palas debe tener un aerogenerador, ya sea simple o de doble rotor, es importante por varias razones, pues el número de palas afecta en la captura de viento. Algunos autores están recomendando tener diferentes números de palas en el rotor frontal y en detrás, se recomienda que delante tiene menor cantidad de palas y en el segundo juego de palas con mayor cantidad (Figura 32).

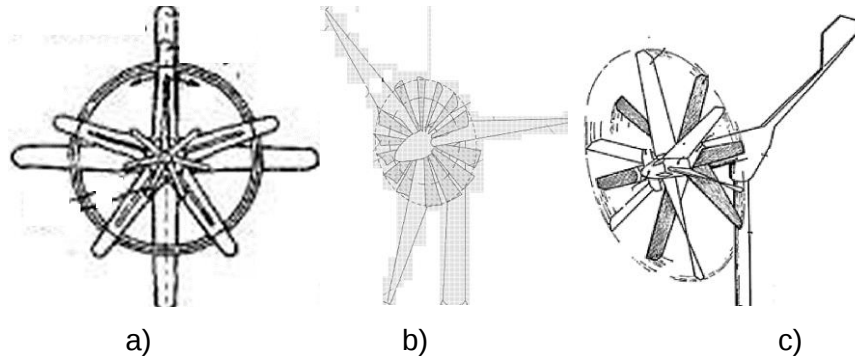


Figura 32. Diferentes diseños de juegos de aspas con mayor cantidad de palas, a) 1er juego 6 palas, 2 juegos 5 palas, 3er juego 3 palas, b) 1er juego 14 palas, 2do juego 3 palas, c) 1er juego 5 palas, 2do juego 6 palas.

Lo mejor es elegir tal relación entre los números de las palas dispuestas coaxialmente de ruedas de viento que de dos de estas ruedas siempre puede coincidir una sola hoja de la rueda delantera, es decir, cubrir en un cierto instante de tiempo una hoja de la rueda detrás, aunque lo más común es tener un diseño con 3 palas en cada juego de aspas.

Forma de palas

Dentro de los esquemas de las 85 patentes revisadas, se observan diseños totalmente diferentes en cuanto a la forma de las aspas utilizadas en los aerogeneradores, dicho diseño se elige considerando varios factores: aerodinámica, materiales, tamaño, condiciones del viento (lugar de instalación), eficiencia y coste, normativas y estándares. A continuación, se muestran algunos ejemplos en los que se nota la diferencia en la forma de las palas (Figura 33).

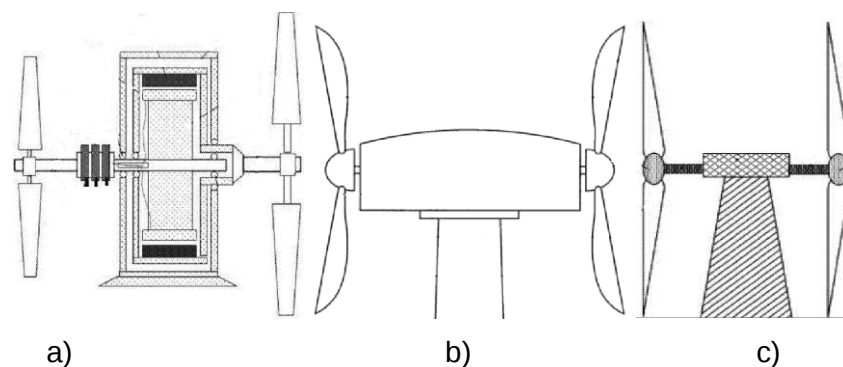


Figura 33. Ejemplos, a) CN106988965A, b) CN109441711A, c) CN104533720A.

En la patente CN104295442A la pala de la turbina eólica se basa en el perfil

aeroespacial RAF89 (Figura 34), cada rueda de viento tiene tres palas; la pala está inclinada de 10 a 15 ° hacia afuera (el ángulo formado por la pala y el plano de rotación de la rueda de viento) y la desalineación es de 60 grados.

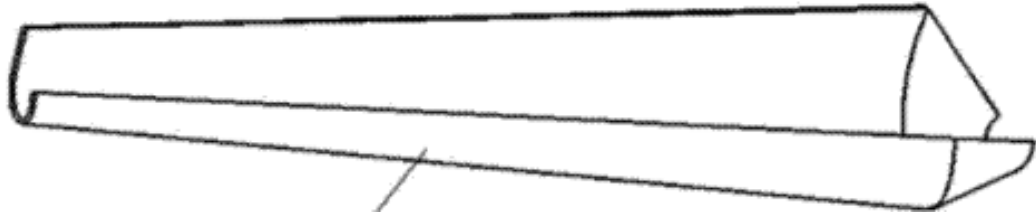


Figura 34. Perfil aerospacial RAF89.

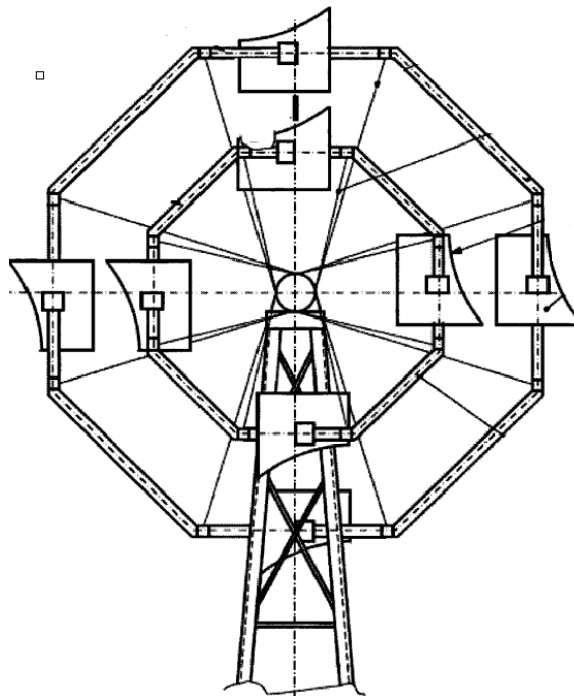


Figura 35. Vista del generador eólico con eje de rotación horizontal.

El aerogenerador eólico de la Figura 35 se caracteriza porque en la parte superior de los álabes adicionalmente es cóncava, que forma un ángulo B con el plano perpendicular al plano de la simetría de las turbinas.

En la Figura 36 se muestra un aerogenerador donde los rotores están equipados con los álabes que se caracterizan porque en la flecha, detrás de la turbina de sotavento, se instala el timón de cola y dentro de la góndola se fijan dos coronas dentadas de igual número de dientes.

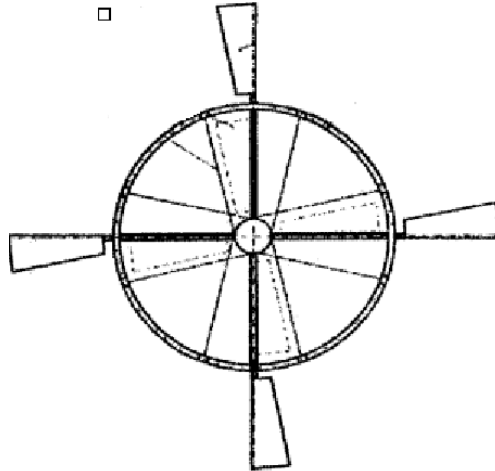


Figura 36. Vista por la sección B-B que es la vista frontal sobre la turbina de sotavento.

Control

Con sensores que recopilan datos de velocidad del viento en el rotor delantero y trasero el 29% de las patentes proponen utilizar sensores de velocidad, y además dos torquímetros con dos convertidores que controlan la velocidad de rotación y del generador trasero cambiando la amplitud de corriente [3, 4, 9, 13, 71], recopila datos de funcionamiento reales de la turbina del doble rotor, basado en un algoritmo de programación dinámica [18], o bien cuenta con un aumentador de velocidad en su diseño [43].

Opcionalmente en un diseño se incluye una unidad de modulación [4], otras tres patentes más cuentan con un transformador elevador en el diseño [5, 8, 11]; En otro diseño se agrega un compensador de desacoplamiento en el proceso de control para obtener una mejora [12].

Otro método de control utilizado es el monitoreo de operación en tiempo real se implementa para supervisar los parámetros operativos en tiempo real de la potencia de salida, la velocidad del rotor y el ángulo de paso de las palas de las dos unidades de la turbina eólica flotante de doble rotor [29].

Cuenta con un componente de control que se utiliza para ajustar la pala del rotor según la orientación del viento [22, 23, 42, 56, 61, 82] En otros casos se implementa un sistema de detección y supresión de vibraciones en las palas del aerogenerador [7, 37].

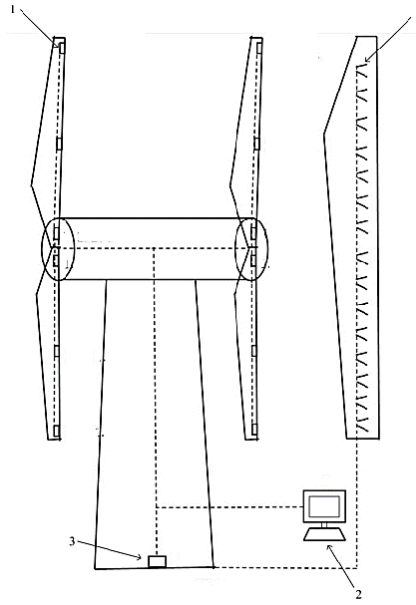


Figura 37. Método de detección y supresión de vibración de palas (CN117212040A).

En la Figura 37 el dispositivo sensor (1) está conectado con el servidor (2), y el dispositivo sensor 1 está dispuesto sobre las palas del grupo electrógeno de turbina eólica doble, y se utiliza para recopilar el flujo entrante y los datos relacionados de las palas en tiempo real, y cargar los datos recopilados al servidor 2. El servidor 2 se utiliza para recibir y almacenar los datos cargados por el dispositivo sensor 1, procesar los datos y clasificar los números de denominación de acuerdo con un formato preestablecido. El dispositivo generador de detección 3 está conectado respectivamente con el servidor 2 y el dispositivo de supresión 4, y se utiliza para llamar a los datos en el servidor 2, juzgar el riesgo de ocurrencia de aleteo de pala y vibración de vórtice, y si se juzga que existe el riesgo, emitir un comando para iniciar el dispositivo de supresión 4. El dispositivo de supresión 4 está dispuesto sobre la pala, y está configurado para recibir la instrucción del dispositivo generador de detección 3 y suprimir la vibración de la pala.

El rotor delantero y el rotor trasero comparten un sistema de guiñada [6, 20, 26, 28, 40, 41, 47] (gira la góndola completa y se asegura de que las palas estén orientadas continuamente hacia el viento), el rotor delantero usa solo el primer sistema de paso y el rotor trasero usa solo el segundo sistema de paso,

colocando también un regulador de par, que permita, más especialmente, mantener un par constante y dispersar la potencia sobrante, en forma de trabajo útil o de otro modo, o también sólo parcialmente en forma de trabajo útil, en todos los casos. [14, 17, 24, 47, 50, 67, 74, 75] (Figura 38)

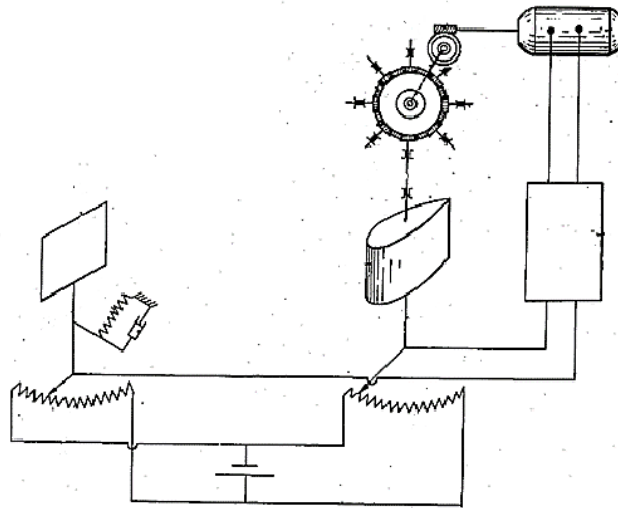


Figura 38. Vista esquemática de un dispositivo para controlar las variaciones del paso de cualquier álabe de las ruedas de paletas (US2653250A).

Una prueba más demostró que la corriente de aire después del primer rotor de la turbina se mueve más lento que la corriente de aire antes del primer rotor, eso significa que la corriente de aire es más amplia después del primer rotor [54], El convertidor de frecuencia CA-CC-CA conectado al lado del estator controla la corriente y el voltaje del estator para generar la misma frecuencia, amplitud y fase que la red eléctrica [39].

Aumento de potencia

Una prueba más demostró que la corriente de aire después del primer rotor de la turbina se mueve más lento que la corriente de aire antes del primer rotor, eso significa que la corriente de aire es más amplia después del primer rotor [54]. La capacidad de generación de energía aumentó entre un 30% y un 40% (CN106988965A, 2017), en [20] se obtiene una potencia nominal en la unidad de 0,5 a 15 MW. La Figura 39 muestra los factores de potencia o coeficientes de potencia C_p , de varios tipos de rotores eólicos esbozados en función de sus relaciones de velocidad de punta X . [69]. La curva 103 es para un rotor de hélice ideal, que siempre estará por encima de lo realizable, es decir, debido a la fricción

en los rotores reales.

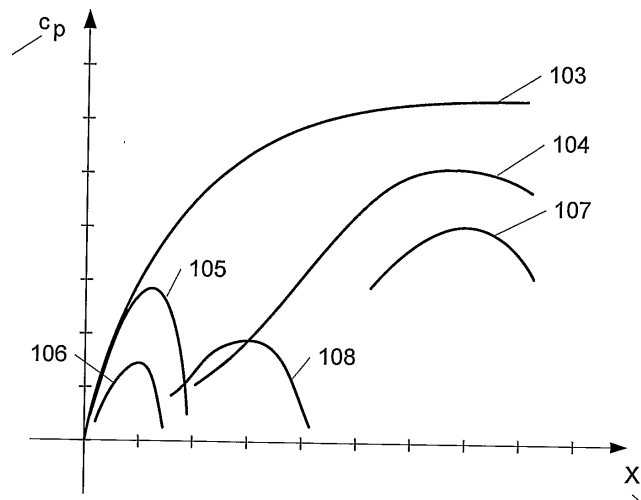


Figura 39. Coeficientes de potencia de varios rotores eólicos.

La curva 104 muestra el coeficiente de potencia para un corredor rápido, que es la designación de un rotor cuyas velocidades de punta son varias veces mayores que la velocidad del viento. Las plantas de energía eólica modernas con tres palas son de rodadura rápida.

Un corredor lento de varias palas, como una rosa de los vientos, tiene las características que se muestran en la curva 105.

La curva del coeficiente de potencia de un molino de viento anticuado viene dada por 108, y las curvas 106 y 107 se aplican a una turbina Savonius y a una turbina Darrieus, respectivamente, que son turbinas con ejes verticales de revolución.

La relación de velocidad de la punta X se da como la relación entre la velocidad de la punta de la pala y la velocidad del viento y , por lo tanto, varía proporcionalmente con la longitud de la pala e inversamente proporcionalmente con el tiempo de revolución de la pala (el tiempo que se tarda en realizar una revolución completa).

Para lograr la máxima potencia de salida de un rotor, su tiempo de revolución debe ajustarse al diámetro del rotor, de modo que un rotor más grande debe girar más lentamente que uno pequeño. Estas curvas de coeficiente de potencia se utilizan para obtener ventaja en lo siguiente para diseñar una planta de energía eólica con un aprovechamiento óptimo del viento [69]

Pruebas realizadas con un total de siete rotores, de 1.6 m de diámetro y un ángulo α (alfa) del eje de transmisión desplazado 25 grados desde la dirección del viento, permitieron que todos los rotores contribuyeran con una potencia casi máxima [40].

El Cuadro 6 presenta las especificaciones contempladas en la revisión de los diseños de patentes, mostrando el porcentaje de diseños que optan por una característica en su diseño.

Cuadro 6. Características de diseño por patente

Especificación		%	Patentes
Sentido de giro			
Rotante		20	[10,12,16-18, 28, 29, 34, 36, 49, 54, 56, 64,69, 70, 72, 84]
Contrarrotante		71	[1-4, 8, 9, 13, 14, 19-27, 30, 33, 35, 37-41, 43-48, 50-53, 55, 57-63, 65-68, 71, 73-83, 85]
Ambos		7	[5, 6, 11, 31, 32, 42]
Tamaño de aspas			
Mismo tamaño		35	[7, 15, 25, 28, 29, 33, 35-38, 42, 44, 47, 49, 52, 55, 57-59, 61, 62, 67, 68, 74-77, 79, 81]
Diferentes tamaños	1ras más grandes	34	[1, 2, 4-6, 8-11, 13, 17, 19-22, 27, 30-32, 41, 43, 45, 50, 60, 65, 70, 71, 82, 84, 85]
	1ras más pequeñas	21	[3, 14, 24, 26, 34, 39, 51, 54, 56, 63, 64, 66, 69, 72, 73, 78, 80, 83]
	Sin mencionar	10	[12, 16, 18, 23, 40, 46, 48, 53]
Ubicación de aspas			
Mismo lado del generador		25	[29, 31, 34, 51, 54, 56-58, 63, 66, 67, 69, 70, 72-74, 77, 78,80, 82, 83, 85]
Lado opuesto del generador		65	[1-11, 13-15, 17, 19-28, 30, 32, 33, 35-39, 41-45, 47, 49, 50, 52, 55, 59-62, 64, 65, 68, 71, 75, 76, 79,]
Generadores			
Cantidad de generadores	1	89	[1-7, 10, 14, 15, 17- 53, 55-79, 82, 84, 85]
	2	11	[8, 9, 11-13, 16, 54, 80, 81, 83]
Ubicación del generador	Horizontal	72	[1, 2, 4-6, 8-11, 13, 14, 17, 19, 21, 22, 24-28, 30, 32-35, 37-39, 41-45, 47, 49-52, 54, 55, 57, 58, 60, 61, 63-65, 67, 68, 70, 72, 75-77, 79, 80, 82-84]
	Vertical	22	[3, 7, 15, 20, 23, 29, 31, 36, 56, 59, 60, 62, 66, 71, 73, 74, 78, 81, 85]
Cantidad de rotores y estatores	1 rotor y 1 estator	73	[3, 4, 7, 10, 14, 15, 17-23, 25-29, 31-34, 36-38, 40-45, 47-50, 53, 55-63, 65-69, 71, 73-78, 80, 82, 84, 85]
	2 rotores (int. y ext.), 2	17	[1, 2, 5, 6, 24, 30, 35, 39, 46, 51, 52, 64, 70, 72, 79]

	estatores (int. y ext.)		
	1 rotor y 1 estator por cada generador	10	[8, 9, 11-13, 16, 54, 81, 83]
Transmisión			
Cantidad de ejes	1	70	[3-7, 10, 14, 15, 17-23, 25, 27, 28, 30, 33, 34, 36-38, 40-45, 47-50, 53, 55-63, 65-69, 71, 73-78, 82, 84, 85]
	2	30	[1, 2, 8, 9, 11-13, 16, 24, 26, 29, 31, 32, 35, 39, 46, 51, 52, 54, 64, 70, 72, 79-81, 83]
0 cajas de cambios		35	[1, 7-9, 13, 15, 16, 23-28, 30, 32-34, 36-38, 45, 49, 51, 54, 55, 58, 59].
1 caja de cambios		18	[3-6, 17, 21, 29, 39, 40, 46, 47, 50, 60, 61, 64, 68, 83]
2 cajas de cambios		11	[2, 11, 14, 20, 22, 35, 43, 49, 52, 81]
Engranés magnéticos		11	[4, 9, 56, 63, 65, 77-79, 83, 84]
Engranés planetarios		11	[3, 52, 66-70, 74, 76]
Engranés cónicos		2	[31, 73]
Engranaje diferencial		2	[71, 75]
Imanes permanentes		4	[38, 53, 64, 82]
Potencia sin escobillas		3	[58, 60, 62]
Cadenas de transmisión		6	[10, 20, 22, 29, 50]
Controles			
Parámetro de control	Posición / orientación	7	[22, 23, 42, 56, 61, 82]
	Velocidad	29	[1, 2, 4, 5, 8, 11, 16, 19, 21, 32, 43, 46, 48, 49, 52, 53, 57, 60, 66, 69, 70, 76, 77, 79, 83]
	Rotación	5	[3, 4, 9, 13, 71]
	Frecuencia	2	[46, 64]
	Potencia	3	[38, 44, 81]
Método de control	Supresión de vibración en las palas	2	[7, 37]
	Sistema de guiñada	8	[6, 20, 26, 28, 40, 41, 47]
	Paso	9	[14, 17, 24, 47, 50, 67, 74, 75]

4.5 Conclusiones

La revisión de 85 patentes sobre aerogeneradores de doble rotor revela un campo en rápida evolución que combina innovaciones tecnológicas y enfoques sostenibles para mejorar la eficiencia de la generación de energía eólica. Los diseños de doble rotor ofrecen ventajas significativas en términos de captación de viento y reducción de turbulencias mediante el uso de métodos de supresión de vibraciones.

Además, la diversidad en las configuraciones y en los sistemas de transmisión y control sugiere que no existe un diseño único que se adapte a todas las situaciones; más bien, cada solución debe ser optimizada según el contexto específico de instalación, no obstante, se recalca el uso de una configuración contra rotante, con un solo eje, solo una caja de velocidades, generador con ubicación horizontal, se recomienda una distancia de separación de 0.2 a 0.25 m entre rotores, considerar un diámetro mayor en el segundo juego de aspas aproximadamente 25-40 % mayor que el primer juego de aspas, al tener una configuración correcta se permite que ambos rotores contribuyan con una potencia casi máxima.

En resumen, los aerogeneradores de doble rotor representan una prometedora dirección en la tecnología eólica, pero es esencial continuar con la innovación y la evaluación crítica para maximizar su potencial en un futuro energético sostenible, la generación de energía aumentó entre un 30% y un 40%.

4.6 Referencias

- ADJUSTABLE DUAL ROTOR WIND TURBINE (US 2017/0292497 A1). (2016).
- BELOGLAZOV SERGEI NESTEROVICH. (2012). DOUBLE WIND GENERATOR (WO2013122507A1).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/048984508/publication/WO2013122507A1?q=WO2013122507A1>
- CHEN BAKANG; WEI YUFENG; SHANG WEI; XU NIANDONG; JIANG XIANGZENG; XIE CHUNQIU; HE JIANBIN; SEOK HYUN. (2023). Monitoring control system and method for double-wind-wheel floating type wind generating set (CN116906278A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/088359485/publication/CN116906278A?q=CN116906278A>
- CHEN BOBING. (2019). Double-rotor double-blade wind driven generator (CN211202190U).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/071860838/publication/CN211202190U?q=CN211202190U>
- CHEN JIAJIA; SHEN XIN; ZHU XIAOCHENG; OUYANG HUA; DU CHAOHUI. (2023). Tandem double-wind-wheel wind turbine pneumatic calculation method and system based on lifting surface (CN116822172A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/088115851/publication/CN116822172A?q=CN116822172A>
- DIAO TONGSHAN. (2018). Dual-rotor permanent-magnet doubly-fed wind power generator and power generation system (CN108365718A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/063005298/publication/CN108365718A?q=CN108365718A>
- DIAO TONGSHAN; LIU JIAHE; WANG YAN. (2019). Double-rotor induction wind driven generator and working method thereof (CN110601479A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/068861725/publication/CN110601479A?q=CN110601479A>
- DIAO TONGSHAN; YAN ZHIGUO; YANG MIN. (2019). Double-stator wind driven generator and power generation system (CN110971095A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/070034018/publication/CN110971095A?q=CN110971095A>
- DIAO TONGSHAN; YI QINGXUAN; YUE CAIJIANG; YANG MIN; WANG YAN. (2023). Double-rotor motor and working method thereof (CN117240032A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/089081663/publication/CN117240032A?q=CN117240032A>
- Dual rotor wind turbine (US694574B1). (2004).
- FENG JIAREN; TIAN LIHONG; FENG HAIXI. (2019). Semi-direct-driven radial compound double-port permanent magnetic synchronous wind driven generator

- (CN110454325A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/068491908/publication/CN110454325A?q=CN110454325A>
- GUERIN GEORGES JULES. (1999). Dual rotor wind turbine for capturing wind energy, providing high-power compact turbine suited to mounting on vehicles, boats, houses or pylons (FR2798168A1).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/009549615/publication/FR2798168A1?q=FR2798168A1>
- GUO XIAOJIANG; LI XINKAI; TANG WEI; YE ZHAOLIANG. (2022). Double-wind-wheel power generation device (CN114576081A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/081776049/publication/CN114576081A?q=CN114576081A>
- GUO XIAOJIANG; LI XINKAI; TANG WEI; YE ZHAOLIANG; YAN SHU; FU MINGZHI; QIN MENG; LAO WENXIN. (2021a). Direct-drive contra-rotating double-wind-wheel wind turbine generator (CN112324623A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/074309429/publication/CN112324623A?q=CN112324623A>
- GUO XIAOJIANG; LI XINKAI; TANG WEI; YE ZHAOLIANG; YAN SHU; FU MINGZHI; QIN MENG; LAO WENXIN. (2021b). Direct-driven contra-rotating double-wind-wheel wind turbine generator (CN214366534U).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/077981185/publication/CN214366534U?q=CN214366534U>
- GUO XIAOJIANG; QIN MENG; FU MINGZHI; LI ZHENG; SUN CAIXIN. (2022a). Hybrid drive type double-wind-wheel wind generating set (CN114687919A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/082139160/publication/CN114687919A?q=CN114687919A>
- GUO XIAOJIANG; QIN MENG; FU MINGZHI; LI ZHENG; SUN CAIXIN. (2022b). Hybrid drive type double-wind-wheel wind generating set (CN114718800A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/082237163/publication/CN114718800A?q=CN114718800A>
- GUO XIAOJIANG; QIN MENG; LI ZHENG; SUN CAIXIN; FU MINGZHI. (2021). Tandem double-wind-wheel single-motor direct-current series unified grid-connected system (CN114123310A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/080377025/publication/CN114123310A?q=CN114123310A>
- GUO XIAOJIANG; TANG WEI; LAO WENXIN; ZHOU YIMING; LI XINKAI; YE ZHAOLIANG. (2021). Double-wind-wheel wind turbine generator with cabin of auxiliary supporting structure (CN113279901A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/077286592/publication/CN113279901A?q=CN113279901A>
- GUO XIAOJIANG; TANG WEI; LI XINKAI; YE ZHAOLIANG; LAO WENXIN. (2020). Double-wind-wheel offshore floating type wind turbine generator (CN112696310A).

- <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/075513425/publication/CN112696310A?q=CN112696310A>
- GUO XIAOJIANG; TANG WEI; LI XINKAI; YE ZHAOLIANG; YAN SHU; FU MINGZHI; QIN MENG; LAO WENXIN. (2021a). Semi-direct-drive tandem double-wind-wheel wind turbine generator (CN214304168U).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/077845302/publication/CN214304168U?q=CN214304168U>
- GUO XIAOJIANG; TANG WEI; LI XINKAI; YE ZHAOLIANG; YAN SHU; FU MINGZHI; QIN MENG; LAO WENXIN. (2021b). Semi-direct-drive tandem double-wind-wheel wind turbine generator set (CN112302878A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/074487320/publication/CN112302878A?q=CN112302878A>
- GUOXIAN HU. (2012). Dual-blade wind generator with wind rudder (CN102758739A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/047053335/publication/CN102758739A?q=CN102758739A>
- HERMANN HONNEF. (1938). Improvements in and relating to wind-operated power generators (GB492489A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/010340879/publication/GB492489A?q=GB492489A>
- HOU XIAOYU. (2017a). Double wind wheel birotor aerogenerator (CN206889173U).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/061319533/publication/CN206889173U?q=CN206889173U>
- HOU XIAOYU. (2017b). Double-windwheel and double-rotor type wind-driven generator (CN106988965A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/059421229/publication/CN106988965A?q=CN106988965A>
- HU SHUJU; FENG SHUAI; SONG BIN. (2023). Parallel double-wind-wheel wind turbine generator and control method (CN117189458A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/088996323/publication/CN117189458A?q=CN117189458A>
- HU YANG; SHAO MAOFENG; FANG FANG; LIU JIZHEN. (2023). Tandem type double-wind-wheel wind turbine generator multi-scene coordinated operation method (CN116292095A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/086814824/publication/CN116292095A?q=CN116292095A>
- HUA XIAOPING; PEI CHUNGUANG; LIU ZIMING. (2022). Horizontal-shaft vertical-wind-direction double-wind-wheel direct-driven wind generating set (CN115585091A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/084771913/publication/CN115585091A?q=CN115585091A>
- HUAJUN WANG. (2006). Telescopic Double-rotor variable speed and variable frequency power generator (CN100495900C).

- <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/038692917/publication/CN100495900C?q=CN100495900C>
- JAKUBASZEK MAREK. (2012). Dual Rotor Wind or Water Turbine (US2014021722A1). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/049945930/publication/US2014021722A1?q=US2014021722A1>
- JIA YINGYING. (2020). Efficient double-turbine fan blade device for electric wind power generation (CN213655042U). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/076691796/publication/CN213655042U?q=CN213655042U>
- JIANZHONG ZHANG; YUANYUAN WANG; MING CHENG. (2012). Grid-connected control system and method for variable-speed constant-frequency (VSCF) double-rotor permanent magnet wind generator (CN102638058A). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/046622353/publication/CN102638058A?q=CN102638058A>
- JINYONG XU. (2008). 12MW dual-layer horizontal reverse rotation following variable-angle blade direct-driving synchronous wind turbine generator (CN101550910A). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/041155344/publication/CN101550910A?q=CN101550910A>
- LEE YONG BOK. (2022). Dual-rotor Structure Permanent Magnet Generator for Wind Power Generation (KR20240003165A). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/089533286/publication/KR20240003165A?q=KR20240003165A>
- LI XINKAI; GUO XIAOJIANG; LIU XIN; TANG WEI; YE ZHAOLIANG; YAN SHU; LAO WENXIN. (2021a). Double-wind-wheel wind turbine generator wind tunnel experiment scale model (CN215065150U). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/079230280/publication/CN215065150U?q=CN215065150U>
- LI XINKAI; GUO XIAOJIANG; LIU XIN; TANG WEI; YE ZHAOLIANG; YAN SHU; LAO WENXIN. (2021b). Double-wind-wheel wind turbine generator wind tunnel experiment scale model and working method thereof (CN113267318A). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/077236082/publication/CN113267318A?q=CN113267318A>
- LI XINKAI; GUO XIAOJIANG; TANG WEI; YE ZHAOLIANG. (2022a). Double-wind-wheel power generation device (CN114576078A). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/081777339/publication/CN114576078A?q=CN114576078A>
- LI XINKAI; GUO XIAOJIANG; TANG WEI; YE ZHAOLIANG. (2022b). Double-wind-wheel power generation device (CN114576083A). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/081776189/publication/CN114576083A?q=CN114576083A>
- LI XINKAI; GUO XIAOJIANG; TANG WEI; YE ZHAOLIANG. (2022c). Double-wind-wheel

- power generation device (CN114576080A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/081783601/publication/CN114576080A?q=CN114576080A>
- LI XINKAI; GUO XIAOJIANG; TANG WEI; YE ZHAOLIANG. (2022d). Double-wind-wheel power generation equipment (CN114738177A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/082276670/publication/CN114738177A?q=CN114738177A>
- LI XINKAI; LIU XIN; YE ZHAOLIANG; LIAO CAICAI; YIN TIENAN; YAN SHU; SUN MANJIE. (2021). Double-power-generation-mode generator set and offshore wind power system (CN114508457A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/081548563/publication/CN114508457A?q=CN114508457A>
- LI YAO; ZHU HUIMIN; LIU SHUANG; FANG ZIFAN; DENG YUE; NI GAOXIANG. (2022). Double-wind-wheel floating type wind turbine and multi-body truss type platform (CN115143026A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/083411318/publication/CN115143026A?q=CN115143026A>
- LI YONG; ZENG JIANLIANG. (2016). Multi-wind-wheel double-rotor wind turbine generator system tree (CN106050575A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/057417952/publication/CN106050575A?q=CN106050575A>
- LI ZHAOMING; NIU TIANJUN. (2023). Horizontal-shaft double-rotor-wing wind driven generator (CN219733552U).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/088051054/publication/CN219733552U?q=CN219733552U>
- LIAO LIDA; TAN QI. (2019). Dual-impeller contra-rotating horizontal-axis wind turbine (CN110345000A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/068178180/publication/CN110345000A?q=CN110345000A>
- LIU LEI; LI HAIFENG. (2014a). Homodromous double-wind wheel power generation device (CN104533720A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/052849311/publication/CN104533720A?q=CN104533720A>
- LIU LEI; LI HAIFENG. (2014b). Horizontal-shaft dual-rotor wind power generation device (CN204253275U).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/052957592/publication/CN204253275U?q=CN204253275U>
- LIU TINGKUN; CHEN LIANGUI; SONG BOHA. (2019). Double-impeller wind power rare earth permanent magnet generator (CN211321174U).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/072057010/publication/CN211321174U?q=CN211321174U>

- LLOYDS BANK LTD. (1922). Improvements in windmills and the like (GB180364A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/010384222/publication/GB180364A?q=GB180364A>
- LU JIRONG; LU YAO. (2021a). Double-magnetic-circuit coreless double-blade wind driven generator (CN215408989U).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/079675695/publication/CN215408989U?q=CN215408989U>
- LU JIRONG; LU YAO. (2021b). Double-magnetic-circuit coreless double-blade wind driven generator (CN115370538A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/084059350/publication/CN115370538A?q=CN115370538A>
- LU ZHIKE; GUO XIAOJIANG; LU KUNPENG; TANG WEI; LAO WENXIN; YE ZHAOLIANG; LIU XIN; YAN SHU. (2023). Tandem type double-wind-wheel wind turbine generator load monitoring device and prediction method (CN116292143A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/086813169/publication/CN116292143A?q=CN116292143A>
- MA ZHONGWEI; XU HUI; HU XIAOGUANG; ZE XIAOCHEN. (2014). Permanent-magnet speed-regulating mechanism of bi-rotor horizontal-axis wind turbine (CN203962295U).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/051922890/publication/CN203962295U?q=CN203962295U>
- PAN PAN; CAI XIN; ZHU JIE; GU RONGRONG; SHU CHAO; ZHANG LINGXI; YANG JIE. (2014). Dual-wind-wheel horizontal-axis wind turbine (CN104295442A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/052315330/publication/CN104295442A?q=CN104295442A>
- PENG JINZHU. (2016). Two direct -driven wind turbine generators (CN205876612U).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/057687203/publication/CN205876612U?q=CN205876612U>
- PUSTYNNIKOV SERGEJ VLADIMIROVICH. (2009). END DOUBLE-ROTOR WIND GENERATOR (RU2395715C1).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/042698118/publication/RU2395715C1?q=RU2395715C1>
- QIN MENG; FU MINGZHI; GUO XIAOJIANG; JIANG XINGGUANG; BO QIANG. (2023). Double-rotor double-stator wind power generation system (CN117212053A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/089043897/publication/CN117212053A?q=CN117212053A>
- QIN MENG; GUO XIAOJIANG; FU MINGZHI; LI ZHENG; SUN CAIXIN. (2022a). Double-direct-drive type double-wind-wheel wind generating set (CN114776518A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/082425337/publication/CN114776518A?q=CN114776518A>
- QIN MENG; GUO XIAOJIANG; FU MINGZHI; LI ZHENG; SUN CAIXIN. (2022b). Double-

- half direct-drive type double-wind-wheel wind generating set (CN114718801A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/082238230/publication/CN114718801A?q=CN114718801A>
- QIN XIAOPENG. (2018). Clockwise and anticlockwise double-rotation wind driven generator (CN109441711A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/065535111/publication/CN109441711A?q=CN109441711A>
- SELSAM DOUGLAS SPRIGGS. (2007). Multi-rotor wind turbine supported by continuous central driveshaft (AU2006284845A1).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/037809459/publication/AU2006284845A1?q=AU2006284845A1>
- Seungbae LEE. (2016). DUAL ROTOR WIND TURBINE (US20100104417A1).
<https://iprdb.com/patent/US2010104417A1.html?ds=us>
- SIEW, S. S. Ji. (2012). DUAL ROTOR WIND OR WATER TURBINE (US2014021722A1).
- SU WEIXING; SU ZHIWEI; SU ZHICHAO; SU ZHIDAN. (2018). Dual-rotor wind power generation device (CN109209759A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/064980426/publication/CN109209759A?q=CN109209759A>
- SUN QINGDA. (1999). Method for high efficient utilizing of wind power and full rotor double wind wheel wind generator (CN1301919A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/005284845/publication/CN1301919A?q=CN1301919A>
- TAKAISHI ISAO. (2020). DUAL-BLADE WIND POWER GENERATOR (WO2021152866A1).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/077079821/publication/WO2021152866A1?q=WO2021152866A1>
- TIAN DE; DENG YUANZHUO; DENG YING; GUAN LONGSHENG; WANG HAODONG; WANG YONG; SU YI; YANG LIHUA; BAI LIANG; YAN QIHUI; HONG WEI; ZHANG YUHANG; GE TENG TENG. (2023). Double-wind-wheel wind turbine generator blade vibration suppression system and method (CN117212040A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/089043803/publication/CN117212040A?q=CN117212040A>
- TREDWELL EDGAR ARTHUR. (1998). Dual rotor wind turbine with different sized rotors (GB2347178A).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/010845146/publication/GB2347178A?q=GB2347178A>
- WANG QIANG. (2021). Double-wind-wheel direct-drive type wind generating set (CN215521125U).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/079792108/publication/CN215521125U?q=CN215521125U>

- XING ZUOXIA; LIU YANG; WANG XIANGMING; CHEN LEI; XU JIAN; CHEN MINGYANG; LI YUAN; ZHANG PENGFEI. (2020). Double-wind-wheel wind turbine generator operating control system with gas compression transmission (CN111692039A). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/072485935/publication/CN111692039A?q=CN111692039A>
- XU HAORAN; ZHAO HUI; MEI ZHIGANG; CAO YUNXUE. (2018). Double-impeller horizontal shaft wind turbine design optimization method (CN109611268A). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/066002956/publication/CN109611268A?q=CN109611268A>
- XU ZHIXUAN; GAO WEI; ZHANG LEI; ZHANG SHUXIANG; ZHANG LIXING; LIU YANGGUANG; LI SEN. (2019). Novel double-wind-wheel wind driven generator (CN210371010U). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/070261643/publication/CN210371010U?q=CN210371010U>
- XU ZHIXUAN; LIU RENTAO; ZHANG LEI; LIU ZHIWEN; LAI RUHUI; ZHANG LIXING; LI ZHIYAO. (2019). Novel horizontal shaft double-rotor wind driven generator (CN210371011U). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/070261646/publication/CN210371011U?q=CN210371011U>
- YANG KERUI. (n.d.). Double-wind-wheel direct-drive type wind generating set (CN112360680A). In 2020 (CN112360680A). Retrieved August 2, 2024, from <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/074509300/publication/CN112360680A?q=CN112360680A>
- YU YONG. (2015). Dual drive wind power generation set (CN204805030U). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/054589865/publication/CN204805030U?q=CN204805030U>
- ZANG ZHIZHAO; ZHU SHIHUAN; LI ZHIYUAN; SU YUNPENG; ZHU BAOXIANG; XUE ZHIPING; CHANG JIEYUAN; CHANG JIXIANG. (2022). Double-wind-wheel wind driven generator (CN217080670U). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/082501055/publication/CN217080670U?q=CN217080670U>
- ZHANG TIEZHU; YAO YIMIN; BAO HONGGUANG; ZHAO SHIKUN; XING YUQI; ZHANG TONGYU; LI TIANLU; LI XIUMING; ZHANG YINGXU; XING LIFANG. (2023). Tandem type double-wind-wheel wind turbine generator and hoisting method (CN116877321A). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/088261128/publication/CN116877321A?q=CN116877321A>
- ZHANG WENGUANG; FENG XIANZHI; SUN JIAHAO; FANG FANG; WANG QINGHUA; LIU YAJUAN. (2022). Double-wind-wheel wind turbine cooperative protection method based on neighborhood search dynamic programming algorithm (CN114607557A). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/081866815/publication/CN114607557A?q=CN114607557A>

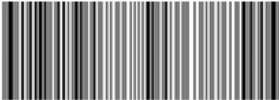
- ZHANG WENGUANG; LUO WEIJIAN; FENG XIANZHI; FANG FANG; HU YANG; LIU YAJUAN; WANG QINGHUA. (2021). Double-wind-wheel wind turbine variable pitch control method based on neural network predictive control (CN113638841A). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/078426130/publication/CN113638841A?q=CN113638841A>
- ZHANG ZHIYANG; WEI MIN; WANG SHILIN; SHI NINGQIANG; YANG TAO; XUE LIANGHAO; LU YONGXIN. (2018). The invention discloses a co-rotating double-wheel wind driven generator (CN208885452U). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/066513587/publication/CN208885452U?q=CN208885452U>
- ZHAO XIN. (2015). Double-rotor wind power generation unit (CN105179177A). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/054901515/publication/CN105179177A?q=CN105179177A>
- ZHENG XIANRUI; SUN YULAN; ZHANG SHUANZHU; LIN XIAOKUN; WANG RONGZE. (2022). Signal tower for dual-drive wind power generation (CN218717245U). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/085635357/publication/CN218717245U?q=CN218717245U>
- ZHOU SHUNI; HAO YUHENG; WANG WEILONG; LIU ZHI; GAO ERJIE; TAO ZHIYU; ZHOU CHUANG. (2023). Parallel type common cabin double-wind-wheel draught fan (CN220227075U). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/089184352/publication/CN220227075U?q=CN220227075U>
- ZHOU TONG; QIN MING; CHANG YONG; HE ZHENFENG; GUO YONGQI; WANG WUBIN; WANG YIN; ZHANG YULI; FAN FAN. (2023). Magnetic gear composite multi-rotor double-wind-wheel wind driven generator and wind turbine generator set (CN117013776A). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/088570782/publication/CN117013776A?q=CN117013776A> Анатолий Георгиевич БАКАНОВ Елена Львовна ТИХОНОБА. (2014). Dual rotor wind power assembly (variants) (US10451029B2).

5. SOLICITUD DE PATENTE A IMPI

5.1 Solicitud de IMPI



IMPI
INSTITUTO MEXICANO
DE LA PROPIEDAD
INDUSTRIAL


MX/E/2025/070440

MX/U/2025/000532

DIRECCIÓN DIVISIONAL DE PATENTES.
SUBDIRECCIÓN DIVISIONAL DE PROCESAMIENTO ADMINISTRATIVO DE PATENTES.

COORDINACIÓN DEPARTAMENTAL DE RECEPCIÓN Y CONTROL DE DOCUMENTOS.

EXPEDIENTE: MX/u/2025/000532
FOLIO DE RECEPCIÓN: MX/E/2025/070440
IDENTIFICADOR DE LA SOLICITUD: 218484
LUGAR, FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN DE LA SOLICITUD:
CIUDAD DE MÉXICO 30/09/2025 06:23:25

ACUSE DE RECIBO DE LA SOLICITUD DE:
Modelo De Utilidad

SOLICITANTE(S)
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

REPRESENTANTE LEGAL:
Juan Luis MORENO ARELLANO

DOCUMENTOS DE LA SOLICITUD:

DOCUMENTO	NOMBRE ARCHIVO	TAMAÑO	HOJA(S)
SOLICITUD	Solicitud_000218484_30_09_2025.pdf	503.21 KB	5
COMPROBANTE DE PAGO	Pago.pdf	22.75 KB	1
HOJA DE DESCUENTO	HOJA DE DESCUENTO.pdf	25.25 KB	1
CONSTANCIA RGP	Constancia RGP-DDAJ-001426-2023.pdf	230.07 KB	2
DOCUMENTO COMPROBATORIO DE DIVULGACION PREVIA	Docs_memoria_congreso_fecha_divulgación_previa.pdf	3072.95 KB	5
MEMORIA TECNICA	Memoria_técnica_EXTRACTOR-AEROGENERADOR DE DOBLE ROTOR.pdf	186.87 KB	37
DIBUJOS	Dibujos_EXTRACTOR-AEROGENERADOR DE DOBLE ROTOR.pdf	147.08 KB	4
OTROS	Cesión derechos invención Ensamble extractor.pdf	1663.09 KB	3

TOTAL DE HOJAS: 58 (No se incluyen hoja(s) del acuse)

Figura 40. Comprobante de recepción de patente MX/E/2025/070440.

5.2 Ensamble de extractor-aerogenerador de doble rotor

5.2.1 Campo técnico de la invención

La presente invención pertenece al campo técnico de la generación de electricidad a partir de la energía cinética del aire proveniente de la salida de un

extractor de aire para invernadero; convirtiendo esta energía en energía mecánica y ésta última en energía eléctrica, pasando por dos rotores de aerogenerador, la presente invención pretende recuperar la máxima cantidad de energía proveniente del aire a la salida del extractor en comparación a la recuperada por un aerogenerador de un solo rotor.

En el apartado “Anexo” está colocado el documento de recepción de solicitud de patente en IMPI con la fecha del 30 de septiembre de 2025.

5.2.2 Objeto de la invención

El objetivo principal de la presente invención es obtener un dispositivo, específicamente un ensamble extractor-aerogenerador de doble rotor para conseguir recuperar al máximo la capacidad de energía cinética del aire proveniente de un extractor de aire de invernadero como una fuente renovable de energía eléctrica.

Otro de los objetivos de la presente invención es múltiple, por un lado, diseñar una herramienta que aproveche la velocidad del viento y producir a través de un solo generador eléctrico la mayor cantidad de energía eléctrica, utilizando dos juegos de aspas conectados al mismo generador.

Otro de los objetivos de la invención además es hacer disponible dicho ensamble de extractor- aerogenerador de doble rotor para aprovechamiento de aire residual y generador de energía eléctrica que se eficiente y funcional.

Otro de los objetivos de la presente invención es hacer que el ensamble mencionado de extractor aerogenerador para aprovechamiento de aire residual y generador de energía eléctrica que permita recuperar la corriente de aire que sale del extractor de invernadero y que pasa por el primer juego de aspas, para posteriormente recuperar la corriente de aire que se libera en la atmosfera después de pasar por el primer juego de aspas y que sea aprovechada al pasar por el segundo juego de aspas y sea transformada en energía eléctrica.

Otro de los objetivos de la invención es conjuntar todas esas mejoras e innovaciones en un ensamble extractor aerogenerador de doble rotor contrarrotante, que haga posible recuperar al máximo la energía cinética del viento proveniente de la salida de un extractor de aire de invernadero y

transformarla en energía eléctrica.

5.2.3 Breve descripción del invento

La presente invención pretende recuperar al máximo la energía cinética del viento proveniente de la salida de un extractor de aire de invernadero y transformarla en energía eléctrica, de esta manera, la invención consiste en ensamblar a la salida del extractor de aire dos juegos de aspas con sentido contrarrotante o no, en el que cada juego de aspas es montado en un rotor de un generador eléctrico diferente o en el mismo, siendo ambos rotores colocados uno adyacente al otro y axialmente alineados.

La presente invención pretende recuperar al máximo la energía cinética del viento proveniente de la salida de un extractor de aire de invernadero y transformarla en energía eléctrica, de esta manera, la invención consiste en una estructura de un extractor axial con un motor eléctrico y transmisión de poleas y bandas, a este se le coloca una carcasa en la que se colocan elementos de soporte radiales en los que se fija centralmente otra polea con un eje axial giratorio de salida en el que se fijan las aspas giratorias de extracción de aire; en la otra cara de esta carcasa se fija con medios de fijación el borde del extremo proximal de un difusor cónico que define un conducto cónico de concentración y conducción del flujo de aire, a la salida del difusor cónico se encuentra una segunda estructura de soporte transversal donde se colocan concéntricamente los medios de generación de energía eléctrica los cuales corresponden a dos juegos de aspas con sentido contrarrotante o rotante, en el que cada juego de aspas es montado en un rotor diferente, siendo ambos rotores colocados uno adyacente al otro y axialmente alineados, que aprovecharan el flujo de aire expulsado por el extractor eje axial concentrado y canalizado por el difusor cónico para producir energía eléctrica. Agregar un segundo rotor es importante debido a las transformaciones de energía que se presentan en el ensamble. En primer lugar, se recibe potencia eléctrica proveniente del motor eléctrico que se encuentra en el extractor de aire, esta se convierte en potencia mecánica, en donde, idealmente el 100% de la potencia eléctrica es convertida a potencia mecánica.

Entonces la cantidad máxima de potencia eólica que se transforma en potencia

mecánica es el 59%. Y, por lo tanto, la potencia eólica proveniente del primer juego de aspas será transformada en potencia eléctrica.

El 41% restante de la energía sale en forma de potencia eólica proveniente del primer juego de aspas y puede ser aprovechada instalando un segundo juego de aspas. De acuerdo con la Ecuación (1) se puede convertir el 59% del restante, por lo tanto, se recuperaría el 24% más.

Al finalizar las transformaciones de potencia presentes en el ensamble extractor aerogenerador de doble rotor se tendrá un aprovechamiento máximo ideal del 83% de potencia eólica proveniente de la salida del extractor de aire, teniendo un restante del 17% que se libera en la atmosfera después de pasar por el segundo juego de aspas.

5.2.4 Breve descripción de las figuras

Para comprender mejor las características de la invención se acompaña a la presente descripción, como parte integrante de la misma, los dibujos con carácter ilustrativo más no limitativo, que se describen a continuación.

La Figura 41 muestra un explotado del ensamble de extractor-aerogenerador de doble rotor para el aprovechamiento de aire residual y generador de energía eléctrica, de conformidad con la modalidad preferida de la presente invención.

La Figura 42 muestra el tipo de transmisión a utilizar dentro de la estructura interna del generador eléctrico.

La Figura 43 muestra una vista frontal del ensamble extractor-aerogenerador de doble rotor, en la que se observan los dos juegos de aspas colocados uno detrás del otro

La Figura 44 muestra una vista lateral del ensamble extractor-aerogenerador de doble rotor, en la que se observa con mayor detalle el difusor cónico utilizado en el ensamble.

5.2.5 Descripción detallada del invento

Los detalles característicos del ensamble de extractor-aerogenerador de doble rotor para el aprovechamiento de aire residual y generador de energía eléctrica, se muestran claramente en la siguiente descripción y en los dibujos ilustrativos

que se anexan, sirviendo los mismos signos de referencia para señalar las mismas partes.

Haciendo referencia a la Figura 41 y 42 el ensamble de extractor aerogenerador de doble rotor para aprovechamiento de aire residual y generador de energía eléctrica consiste en una estructura de extractor (1) de eje axial Multifan 130 de eje horizontal con 5 aspas (4) definida por una carcasa exterior (2) con un orificio central (3) donde se disponen elementos de soporte radiales (14), donde se fija centralmente una polea impulsada con un eje (26) axial giratorio de salida en el que se fijan aspas (4) giratorias de extracción de aire y un orificio excéntrico donde se fija un motor (5) con un sistema de poleas impulsoras (6) que proporcionan el giro a la polea impulsada mediante una banda (7).

En la cara externa de la carcasa exterior (2) del extractor (1) de eje axial se fija con medios de fijación al borde del extremo proximal de un difusor cónico (8) fabricado de lámina galvanizada calibre 26 acero ASTM A653, con un diámetro en la base menor de 1.2 m y en la base mayor de 1.5 m que define un conducto cónico de concentración y conducción del flujo de aire expulsado por dicho extractor (1) de eje axial; externamente al difusor cónico (8) en la carcasa exterior (2), con un orificio central (3) del extractor (1) de eje axial que es de forma cuadrangular.

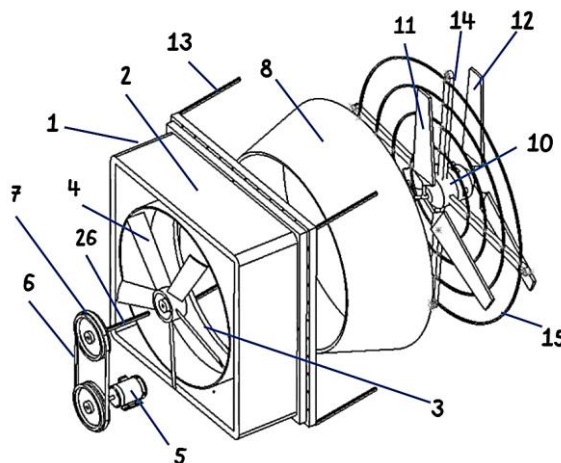


Figura 41. Explosionado del ensamble.

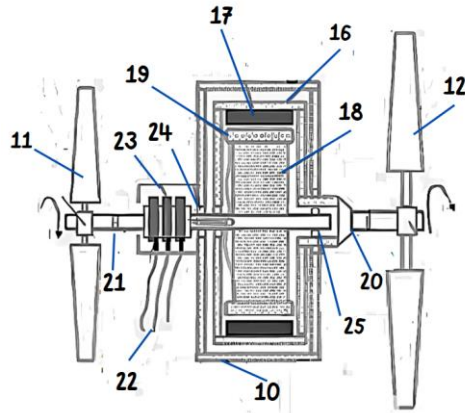


Figura 42. Tipo de transmisión.

La tapa externa está configurada para recibir y fijar una estructura de soporte exterior (9) que se proyecta externamente al difusor cónico (8) donde se disponen los medios de generación de energía eléctrica y donde se monta el rotor que consta de un generador eléctrico (10), conectado con un juego de aspas delanteras (11) y un juego de aspas traseras (12), que aprovechará el flujo de aire expulsado por el extractor (1) de eje axial concentrado y canalizado por el difusor cónico (8) para producir energía eléctrica.

La primera estructura de soporte exterior (9) al difusor cónico (8) está definida por cuatro brazos radiales (14) que se proyectan angularmente que sirven de soporte desde la tapa externa del generador (10) y cuyos extremos opuestos se fijan en la estructura de soporte exterior (9) mediante cuatro brazos extendidos (13).

La estructura de soporte que sostiene al generador (10) consiste en cuatro brazos radiales (14) en forma de cruz, se fijan al centro los medios de generación de energía eléctrica y donde se monta el rotor con las aspas propulsoras (11)(12) y una pluralidad de anillos concéntricos (15) fijos a dichos cuatro brazos radiales (14) definiendo una rejilla de soporte, en donde en los extremos de los brazos radiales (14) se fijan los extremos de los cuatro brazos extendidos (13) de la primera estructura de soporte exterior (9) al difusor cónico (8).

El difusor cónico (8) permite expandir la zona de flujo de aire extraído por el extractor (1) para aprovecharse mediante el generador (10).

La carcasa exterior (2) del extractor de eje axial (1) comprende de las mismas

dimensiones que el marco base de soporte y la tapa externa del extractor (1) los cuales se fijan a dicha carcasa (2) del extractor de eje axial (1); La tapa del extractor comprende orificios pasantes coincidentes con los orificios pasantes del borde perimetral del difusor cónico (8) para introducir medio de fijación (no mostrados) y fijar el difusor cónico (8) en la tapa externa del extractor (1).

El diámetro del extremo distal del difusor cónico (8) es igual al diámetro de la primera estructura de soporte transversal (9) del generador (10).

De acuerdo con la figura 4, las aspas giratorias (4) de extracción de aire del extractor se conforman por 5 palas rectangulares que se colocan sobre un eje (26) rotatorio con cierto ángulo de inclinación para aumentar el flujo de aire producido. Los dos juegos de aspas propulsoras (11)(12) del aerogenerador consisten en 3 palas las cuales son más delgadas que las aspas giratorias de extracción de aire (4) del extractor y se conforman de una zona rectangular plana y una zona curva las cuales están configuradas para dar un mayor número de revoluciones producida por el aire expulsado por el extractor y de esta manera generar una mayor cantidad de energía eléctrica, teniendo entonces dos juegos de aspas de tres palas cada uno.

Haciendo referencia a la Figura 42 la presente realización proporciona un generador (10) está provisto de un rotor exterior (16), con imanes permanentes (17), y un rotor interior (18) con bobina eléctrica (19). El rotor exterior (16) está encaminado en la carcasa del generador (10). El rotor exterior (16) está conectado a la rueda de viento trasera (12) a través del eje principal trasero (20), y el rotor interior (18) está conectado a la rueda de viento delantera (11) a través del eje principal delantero (21) la carcasa del generador (10). La salida eléctrica de los contactos giratorios (22) de la bobina eléctrica (23) está para conectarse con la carga externa. Los cuatro brazos radiales (14) sostienen el generador eléctrico (10) en la estructura de soporte transversal. El eje principal delantero (21) está puesto en carcasa del generador (10) con cojinete (24) y en eje principal trasero (20) con cojinete (25).

El invento ha sido descrito suficientemente como para que una persona con conocimientos medios en la materia pueda reproducir y obtener los resultados

que se mencionan en la presente invención. Sin embargo, cualquier persona hábil en el campo de la técnica que compete el presente invento puede ser capaz de hacer modificaciones no descritas en la presente solicitud, sin embargo, si para la aplicación de estas modificaciones en una estructura determinada o en el proceso de manufactura de este, se requiere de la materia reclamada en las siguientes reivindicaciones, dichas estructuras deberán ser comprendidas dentro del alcance de la invención.

5.2.7 Reivindicaciones

Habiendo descrito suficientemente la invención, se relama como propiedad lo contenido en las siguientes cláusulas reivindicatorias.

1. Un ensamble de extractor-aerogenerador de doble rotor para el aprovechamiento de aire residual y generación de energía eléctrica del tipo de extractor de eje axial que comprende una estructura definida por un extractor axial con un motor eléctrico y transmisión de poleas y bandas, se le coloca una carcasa en la que se colocan elementos de soporte radiales en los que se fija centralmente otra polea con un eje axial giratorio de salida en el que se fijan las aspas giratorias de extracción de aire caracterizado porque en la otra cara de esta carcasa se fija con medios de fijación el borde del extremo proximal de un difusor cónico que define un conducto cónico de concentración y conducción del flujo de aire.
2. El ensamble de extractor aerogenerador de doble rotor para aprovechamiento de aire residual y generador de energía eléctrica, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque a la salida del difusor cónico se encuentra una segunda estructura de soporte transversal donde se colocan concéntricamente los medios de generación de energía eléctrica los cuales corresponden a dos juegos de aspas con sentido contrarrotante o rotante.
3. El ensamble de extractor aerogenerador de doble rotor para aprovechamiento de aire residual y generador de energía eléctrica, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque detrás de la

estructura que soporta el generador eléctrico y el primer juego de aspas, se encuentra el segundo juego de aspas.

4. El ensamble de extractor aerogenerador de doble rotor para aprovechamiento de aire residual y generador de energía eléctrica, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque las palas del aerogenerador tanto del primer rotor como del segundo rotor presentan diferentes áreas de barrido debido a la diferencia de longitudes de aspas.
5. El ensamble de extractor aerogenerador de doble rotor para aprovechamiento de aire residual y generador de energía eléctrica, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque las palas del aerogenerador tanto del primer rotor como del segundo rotor presentan áreas de barrido iguales debido a que ambos juegos de aspas tienen la misma longitud.
6. El ensamble de extractor aerogenerador de doble rotor para aprovechamiento de aire residual y generador de energía eléctrica, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque la longitud del primer juego de aspas es menor que la longitud del segundo juego de aspas.
7. El ensamble de extractor aerogenerador de doble rotor para aprovechamiento de aire residual y generador de energía eléctrica, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque la longitud del segundo juego de aspas es mayor que la longitud del segundo juego de aspas.
8. El ensamble de extractor aerogenerador de doble rotor para aprovechamiento de aire residual y generador de energía eléctrica, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque cada rotor se encuentra conectado a un generador eléctrico independiente del otro.
9. El ensamble de extractor aerogenerador de doble rotor para aprovechamiento de aire residual y generador de energía eléctrica, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque únicamente se emplea el uso de un solo generador eléctrico; el primer juego de aspas se

encuentra conectado al rotor del generador eléctrico, mientras que el segundo juego de aspas se conecta al estator del generador eléctrico.

10. El ensamble de extractor aerogenerador de doble rotor para aprovechamiento de aire residual y generador de energía eléctrica, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque la distancia entre ambos juegos de aspas varía de 0.20 m a 1.40 m colocando una estructura de soporte horizontal en los cuatro brazos radiales, que permita el desplazamiento de la estructura que soporta al segundo juego de aspas.

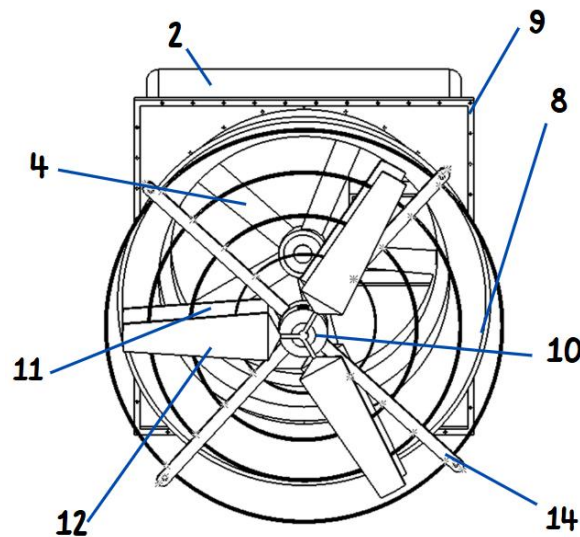


Figura 43. Vista frontal del ensamble.

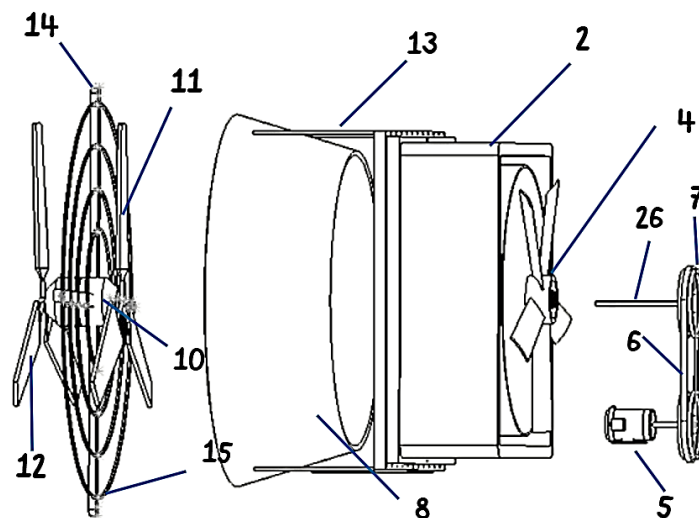


Figura 44. Vista lateral del ensamble

6. CONCLUSIONES GENERALES

6.1 CONCLUSIONES

En esta investigación se diseñó un dispositivo extractor-aerogenerador de doble rotor, el cual, mediante una estructura de dos turbinas eólicas, un cono y un extractor axial en conjunto cuentan con energía eólica residual proveniente del extractor de aire de invernadero, con una eficiencia máxima teórica (sin pérdidas) que se puede recuperar con el sistema extractor-doble aerogenerador es de 0.75. Posterior a las pruebas realizadas, se comprueba que la eficacia real del sistema extractor-doble aerogenerador es de 0.47, demostrando la posibilidad de ser usado efectivamente en construcciones agrícolas e industriales.

La instalación del segundo rotor en un aerogenerador permite recuperar más energía y además aumentar la eficiencia del conjunto, aprovechando el aire residual para generar energía eléctrica, la revisión de literatura realizada recomienda tener un solo generador colocado de forma horizontal, con transmisión simple, tomando el segundo rotor de 25-45% de mayor tamaño que el primero, con una distancia entre ambos rotores de 0.2-0.3 de diámetro, con una configuración de giro contrarrotante.

Durante el proceso de investigación se presentó una solicitud de modelo de utilidad ante el Instituto Mexicano de Propiedad Intelectual, mismo que se encuentra en revisión.