



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

Facultad de Ingeniería Mecánica

División de Estudios de Posgrado

Tesis

Diseño de un Inductor para Turbina Eólica de Eje Vertical Tipo Savonius

Para obtener el grado de: Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica

Autor: Ing. Gonzalo Patiño Renteria
Asesor: Dr. Marco Antonio Espinosa Medina
Coasesor: Dr. Víctor López Garza

Morelia Michoacán, abril de 2026

Índice

Nomenclatura	7
Resumen	8
Palabras clave	8
Abstract	9
Epigrafe	10
Dedicatorias y agradecimientos	11
Planteamiento del problema	12
Objetivo General	12
Objetivos Específicos	12
Justificación	12
Hipotesis	12
Introducción	13
Estado del Arte	13
Antecedentes	21
Marco Teórico	21
Desarrollo técnico y científico de los molinos.	23
La decadencia de los molinos y el auge de la electrificación.	23
Producción eléctrica a partir del viento.	23
Grandes proyectos de turbinas en Dinamarca y Alemania.	24
Los primeros intentos de generar electricidad a gran escala.	24
Turbinas eólicas en los años 50 antes de la crisis energética.	25
El renacimiento de la energía eólica.	25
Factores geográficos y climáticos.	26
Efectos topográficos y térmicos.	27
Topografía	27
Efectos costeros.	27
Variaciones Estadísticas del Viento.	27
Componentes estacionales.	28
Modelado estadístico estacional.	29
Naturaleza de la turbulencia.	29
Intensidad de la turbulencia.	30
Perfiles de velocidad.	30

Predicción y Pronóstico del Viento; Métodos Estadísticos.	31
Diseño y Supervivencia de Turbinas.	32
Normativas Internacionales.	33
Enfoque de normatividad en turbinas de eje vertical (VAWT) y tipo Savonius. . . .	33
Aerodinámica de las Turbinas Eólicas de Eje Vertical.	34
Parámetros Aerodinámicos	35
Relación de Velocidad de Punta (TSR)	35
Ángulo de ataque (α).	35
Solidez (σ).	37
Coeficiente de Potencia (C_p).	37
Coeficiente de Momento (C_m).	38
Coeficientes de Fuerza Normal y Tangencial (C_n , C_t).	39
Número de Reynolds (Re).	39
Relación de Inducción Axial (a).	41
Modelos de Turbulencia.	42
Categorización de los Modelos de Turbulencia.	42
RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)	42
LES (Large Eddy Simulation)	42
DNS (Direct Numerical Simulation):	42
Modelos RANS.	43
Ecuaciones de Navier-Stokes.	43
Modelo Spalart-Allmaras.	43
Modelo $k - \epsilon$	44
Modelo $k - \omega$	44
Simulación de Grandes Escalas (LES).	45
Simulación Numérica Directa (DNS).	45
Simulación de Remolinos Desprendidos (DES).	45
Rotor Savonius.	46
Antecedentes Históricos y Origen.	46
Desarrollo y Evolución.	46
Variantes Principales.	47
Dinámica de Fluidos Computacional.	47
Ecuaciones Fundamentales de la Dinámica de Fluidos.	47
Análisis de Independencia de Malla	51
Metodología.	51
Variables de Diseño.	52
Velocidad del flujo de aire	52
Presión de viento	53
Densidad del aire	53
Viscosidad dinámica	53
Diámetro y radio del rotor	54
Velocidad Específica	54
Potencia Disponible.	54
Diseño del rotor Savonius.	55
Propuesta de Diseño del Inductor.	58

Análisis Mediante Simulaciones CFD.	66
Geometría, Dominio y Secciones.	66
Mallado	69
Configuración del Entorno CFD.	71
Resultados	74
Análisis de Convergencia de Malla	79
Resultados de C_m , C_p , Torque y Potencia; Análisis CFD del Rotor Savonius.	81
CP y C_m a Diferentes Velocidades Específicas (TSR).	85
Manufactura de Rotor e Inductor.	88
Diseño de Veleta	95
Pruebas Experimentales.	102
Calibración de Sección de Pruebas.	102
Selección de Carga Eléctrica para el Generador.	104
Pruebas de Rotor Savonius sin Inductor.	105
Pruebas Experimentales de Rotor Savonius con Inductor.	108
Discusión de Resultados:	112
Conclusiones	116
Impacto Científico	117
Impacto Social	117
Aportación a la Solución de Problemas Prioritarios	117
Acciones de Difusión	118
Bibliografía	121

Índice de figuras

1.	Figura 1: Diferentes Platos Deflectores [6]	15
2.	Figura 2: Turbina Savonius Multietapa con Inductor [25]	16
3.	Figura 3: Diseño de Cortina [40]	16
4.	Figura 4: Placa Obstaculo [2]	17
5.	Figura 5: Inductor en Forma de Perfil Aerodinámico [26]	17
6.	Figura 6: Inductor en Forma de Disco Poroso [27]	18
7.	Figura 7: Inductor Pasivo	18
8.	Figura 8: Etapas de Rotor Savonius [37]	19
9.	Triángulo de velocidades en una turbina eólica de eje vertical (VAWT).	36
10.	Figura 9: Geometría Base de Rotor Savonius	56
11.	Figura 10: Geometría de Palas Rotor Savonius	56
12.	Figura 11: Trayectoria de Extrucción Rotor Savonius	57
13.	Figura 12: Geometría 3D de Rotor Savonius	58
14.	Figura 13: Variables Principales	59
15.	Figura 14: Propuesta de Inductor	60
16.	Figura 15: Geometría de Diseño del Inductor	65
17.	Figura 16: Inductor Vista 3D	66
18.	Figura 17: Geometría de Rotor Savonius con Inductor	67
19.	Figura 18: Dominio Computacional	67
20.	Figura 19: Dominio de Refinamiento	68
21.	Figura 20: Dominio Rotatorio	68
22.	Figura 21: Mallado de Dominio General	70
23.	Figura 22: Mallado de Dominio de Refinamiento	71
24.	Figura 23: Mallado de Dominio Rotatorio	71
25.	Figura 24: Escala de Residuales	73
26.	Figura 25: Vectores de Velocidad con Inductor	74
27.	Figura 26: Vectores de Velocidad sin Inductor	75
28.	Figura 27: Contornos de Velocidad con Inductor	75
29.	Figura 28: Contornos de Velocidad sin Inductor	76
30.	Figura 29: Contornos de Presión con Inductor	76
31.	Figura 30: Contornos de Presión sin Inductor	77
32.	Figura 31: Contornos de Velocidad Lateral con Inductor	77
33.	Figura 32: Contornos de Velocidad Lateral sin Inductor	78
34.	Figura 33: Vectores de Velocidad Lateral con Inductor	78
35.	Figura 34: Contornos de Velocidad Lateral sin Inductor	79
36.	Figura 34: Análisis de Independencia de Malla	80
37.	Figura 35: Coeficiente de Momento a Diferentes Ángulos Azimutal	83
38.	Figura 36: Coeficiente de Potencia (C_p) para Diferentes Turbinas Eólicas	84
39.	Figura 37: Coeficiente de Potencia (C_p) para Turbinas Savonius	84
40.	Figura 38: Análisis CFD. Coeficiente de Potencia para Diferentes Velocidades Específicas.	87
41.	Figura 39: Análisis CFD. Coeficiente de Momento para Diferentes Velocidades Específicas.	87
42.	Figura 40: Impresión 3D Rotor Savonius	88

43.	Figura 41: Eje de 10 mm para Rotor Savonius	89
44.	Figura 42: Bridas de Unión.	89
45.	Figura 43: Rotor Savonius con Eje.	90
46.	Figura 43: Manufactura Inductor.	91
47.	Figura 44: Soportes y Chumacera de Inductor.	91
48.	Figura 45: Estructura Base para Montaje de Rotor	92
49.	Figura 46: Soporte y Acoplamiento de Dinamómetro.	93
50.	Figura 47: Soporte y Acoplamiento de Generador.	93
51.	Figura 48: Ensamble Final de Rotor-Inductor.	94
52.	Figura 48: Variables de Veleta	95
53.	Figura 49: Centro de Masa del Inductor Respecto a la Veleta.	96
54.	Figura 50: Dimensiones de Veleta.	100
55.	Figura 51: CAD Veleta.	100
56.	Figura 52: Veleta en Funcionamiento sin Inductor.	101
57.	Figura 53: Veleta en Funcionamiento con Inductor.	101
58.	Figura 54: Anemómetro.	102
59.	Figura 55: Puntos de Muestro de Velocidad de Aire.	103
60.	Figura 56: Datos Técnicos Dinamómetro	105
61.	Figura 57: Montaje de Pruebas Experimentales sin Inductor.	106
62.	Figura 58: Velocidad Especifica vs Coeficiente de Potencia.	108
63.	Figura 59: Velocidad Especifica vs Coeficiente de Momento.	108
64.	Figura 60: Montaje de Pruebas Experimentales con Inductor.	109
65.	Figura 61: Velocidad Especifica vs Coeficiente de Potencia.	111
66.	Figura 62: Velocidad Especifica vs Coeficiente de Momento.	112
67.	Figura 63: Comparativa Velocidad (TSR) Especifica vs Coeficiente de Potencia. . . .	114
68.	Figura 64: Comparativa Velocidad (TSR) Especifica vs Coeficiente de Potencia Rotor Savonius con y sin Inductor.	115
69.	Constancia de Participación Cartel Científico CIIMMA 2024.	118
70.	Constancia de Participación Tianguis de la Ciencia 2025.	119
71.	Constancia de Participación Ponencia Oral; Congreso Estatal Michoacán 2025. . . .	120
72.	Ponencia Oral; Aniversario FIM UMSNH 2025.	121

Índice de tablas

1.	Nomenclatura	7
2.	Principales normas IEC 61400 aplicables a turbinas	34
3.	Clasificación de los regímenes de flujo según el número de Reynolds	41
4.	Metodología CFD: Flujo de trabajo.	50
5.	Parámetros del rotor Savonius	55
6.	Dimensiones del Rotor Savonius	58
7.	Factores y Niveles para Optimización de Inductor de Turbina Savonius	61
8.	Catálogo básico de arreglos ortogonales Taguchi	62
9.	Arreglo ortogonal $L_{16} (4^5)$ – 5 factores a 4 niveles	62
10.	Arreglo Ortogonal para Optimización de Inductor	63
11.	Coeficiente de Momento por Experimento	64
12.	Dimensiones del dominio computacional (respecto al diámetro D del rotor Savonius)	69
13.	Elementos del Dominio Computacional	70
14.	Configuración CFD	72
15.	Comparación de características aerodinámicas con y sin inductor	79
16.	Análisis de convergencia de malla	80
17.	Resultados de simulación CFD - Rotor Savonius sin inductor	82
18.	Resultados de simulación CFD - Rotor Savonius con inductor	82
19.	Análisis CFD TSR 0.4 - Rotor Savonius con inductor	85
20.	Análisis CFD TSR 0.6 - Rotor Savonius con inductor	85
21.	Análisis CFD TSR 0.7 - Rotor Savonius con inductor	86
22.	Análisis CFD TSR 0.8 - Rotor Savonius con inductor	86
23.	Propiedades Geométricas y de Masa del Inductor.	96
24.	Relación entre frecuencia y velocidad del viento.	103
25.	Datos del generador	104
26.	Relación entre Carga Eléctrica y Potencia a una Velocidad de Viento 9 m/s.	104
27.	Resultados de Pruebas Experimentales sin Inductor y sin Carga.	106
28.	Resultados de Pruebas Experimentales sin Inductor.	107
29.	Resultados de Pruebas Experimentales con Inductor y sin Carga.	109
30.	Resultados de pruebas experimentales con inductor	110
31.	Coeficientes de momento (C_m) y potencia (C_p) en función del TSR sin Inductor. . .	111
32.	Coeficientes C_m y C_p en función del TSR con Inductor.	111
33.	Resultados del análisis CFD de la turbina Savonius con y sin inductor	113
34.	Resultados experimentales de la turbina Savonius con y sin inductor	113

Nomenclatura

Tabla 1: Nomenclatura

Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción
A	Área barrida por la turbina [m ²]	C_m	Coefficiente de torque [-]
C_p	Coefficiente de potencia [-]	D	Diámetro del rotor [m]
d	Diámetro de las palas [m]	D_I	Diámetro del dominio rotatorio [m]
h	Altura del inductor [m]	L	Longitud del inductor [m]
LA	Longitud del inductor pala cóncava [m]	LE	Longitud del inductor pala convexa [m]
M	Torque [N·m]	N	Número de Palas [-]
P	Presión [Pa]	P	Potencia [W]
R	Radio del rotor [m]	Re	Número de Reynolds [-]
RS	Ángulo en la salida del inductor [°]	TI	Intensidad de turbulencia [%]
U	Velocidad incidente del viento [m/s]	y^+	Distancia adimensional del cuerpo a la primera capa del mallado [-]
λ	Relación de velocidad en la punta (TSR) [-]	μ	Viscosidad dinámica del aire [kg/ms]
ρ	Densidad del aire [kg/m ³]	ϑ	Ángulo del inductor pala convexa [°]
ϕ	Ángulo del inductor pala convexa [°]	ω	Velocidad angular del rotor [rad/s]

Resumen

La creciente demanda global de energía, el agotamiento de los combustibles fósiles y las crecientes preocupaciones ambientales han impulsado la búsqueda de fuentes de energía renovable. La energía eólica ha surgido como una alternativa competitiva debido a su naturaleza limpia y abundante. Entre las turbinas eólicas de eje vertical, el tipo Savonius destaca por su diseño simple, bajo costo de fabricación y capacidad para operar en flujos turbulentos. Sin embargo, su eficiencia es relativamente baja en comparación con otros tipos de turbinas. Esta investigación se centra en mejorar la eficiencia de una turbina eólica Savonius helicoidal de dos palas (HSW) mediante la incorporación de un inductor de viento innovador. Utilizando simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) y validación experimental en un túnel de viento, se evaluaron diferentes configuraciones del inductor con el fin de optimizar el diseño y maximizar el coeficiente de potencia. El objetivo es desarrollar una turbina eólica eficiente y de bajo costo, adecuada para entornos urbanos y remotos, contribuyendo a la generación de energía sostenible.

Palabras clave

Turbina
Eólica
Energía
CFD
Inductor

Abstract

The increasing global demand for energy, the depletion of fossil fuels, and growing environmental concerns have driven the search for renewable energy sources. Wind energy has emerged as a competitive alternative due to its clean and abundant nature. Among vertical-axis wind turbines, the Savonius type stands out for its simple design, low manufacturing cost, and ability to operate in turbulent flows. However, its efficiency is relatively low compared to other turbine types. This research focuses on improving the efficiency of a helical Savonius wind turbine (HSW) with two blades by incorporating an innovative wind inductor. Using computational simulations (CFD) and experimental validation in a wind tunnel, different configurations of the inductor will be evaluated to optimize its design and maximize the power coefficient. The goal is to develop a cost-effective, efficient wind turbine suitable for urban and remote environments, contributing to the generation of sustainable energy.

Epigrafe

“Hay hombres que luchan un día y son buenos, hay otros que luchan un año y son mejores, hay quienes luchan muchos años y son muy buenos pero los hay que luchan toda la vida, esos son los imprescindibles.” Bertolt Brecht.

Dedicatorias y agradecimientos

A la persona que tuvo un sueño muy superior y abrió paso entre llanos y laderas para ver crecer el fruto que un día sembró entre miles de tormentas y noches de soledad sin siquiera nada esperar a cambio, más que la felicidad y absoluta superación de aquello que es y será el brillo de sus ojos. Todavía sigo pensando en ti y tu fortaleza para guiar a tus pequeños por un camino que nadie te enseñó y del cual no tuviste antecedente y es verdad no existe formulación o teorema que pueda describir ese patrón de tu bondad, porque así es el amor, tú solo necesitaste de eso, gracias por tu rectitud, gracias por comenzar esta historia, todo esto solo es resultado de tu lucha, tu sueño mamá.

Hermanos, gracias por ser mi ejemplo cada día, gracias por enseñarme de la vida y apreciar el valor de seguir un sueño, siempre serán para mí los hombres que más admiro.

Aun recuerdo tu lealtad resumida en un movimiento de tus caderas y tus ojos fieles acompañandome hasta el amanecer cuando ya no quedaba nadie, para mí nunca te fuiste, de vez en cuando viajo a millones de kilómetros para ver tu luz nuevamente, gracias por ser mi mejor amigo, Egon mi perrito fiel.

Familia, amigos, compañeros, asesores, gracias por ser parte de este proceso, aprender de ustedes, crecer con ustedes y creer en mí, el mérito es suyo.

Planteamiento del problema

El rotor Savonius convencional, aunque simple, tiene una eficiencia relativamente baja con respecto a las turbinas de eje horizontal, que son las que tienen la eficiencia más alta. Esta limitación ha sido abordada mediante diversas estrategias, como la modificación de los parámetros geométricos de las palas [4][5]. Sin embargo, estas modificaciones no han logrado mejoras importantes en términos de eficiencia energética. Adicionalmente, el uso de inductores de viento que redirigen el flujo de aire hacia las partes más eficientes del rotor ha demostrado potencial para aumentar el coeficiente de potencia de los rotores Savonius[6][7]. Estos dispositivos podrían resolver uno de los principales problemas de los rotores Savonius: la desaceleración del rotor causada por el viento que impacta en las superficies convexas de las palas. La principal pregunta que este estudio busca responder es: ¿cómo afecta la incorporación de un inductor al coeficiente de potencia y al rendimiento global de un rotor helicoidal Savonius de dos palas? Además de esto, se explorarán las configuraciones óptimas de posición, tamaño y forma para maximizar la eficiencia del rotor mediante la integración del inductor de viento.

Objetivo General

- Diseñar, analizar y manufacturar un inductor para turbina eólica de eje vertical tipo Savonius.

Objetivos Específicos

- Simular en FEM y CFD un inductor para una turbina de eje vertical tipo Savonius.
- Realizar manufactura aditiva de inductor y rotor Savonius.
- Pruebas experimentales a un inductor para una turbina de eje vertical tipo Savonius.

Justificación

Dado que los rotores Savonius usados en turbinas eólicas tienen un potencial significativo para aplicaciones en entornos urbanos y en áreas con vientos turbulentos, analizar la combinación de geometrías helicoidales y el uso de inductores de viento para mejorar su eficiencia podría proporcionar un avance importante en el diseño de turbinas de eje vertical.

Hipotesis

La incorporación de un inductor de viento entrante en el diseño de un rotor helicoidal Savonius (HSW) de dos palas mejorará significativamente el coeficiente de potencia del rotor, optimizando su rendimiento aerodinámico al dirigir el flujo de aire hacia las superficies más eficientes de las palas y reduciendo las pérdidas causadas por la desaceleración en las superficies convexas.

Introducción

En las últimas décadas, la demanda de energía eléctrica a nivel mundial, el alto consumo de los combustibles derivados del petróleo y el alto impacto de las mismas en sentido ambiental han aumentado la búsqueda de fuentes de energía renovables, es por ello que la energía eólica se ha establecido como una alternativa competitiva debido a su naturaleza limpia y abundante. El uso de perfiles aerodinámicos para producir trabajo surgió desde varios siglos atrás, se usaban los molinos de viento y velas de barcos, las cuales fueron las bases, haciendo uso principalmente de palos de bambú y tela [1]. Entre los distintos modelos de turbinas eólicas de eje vertical que existen actualmente, se encuentran las de tipo Savonius, estas tienen varias ventajas, incluyendo un diseño simple, bajo costo de fabricación y mantenimiento, así como la capacidad de operar en flujos turbulentos [2]. Sin embargo, comparado con otros tipos de turbinas eólicas, el rotor Savonius convencional tiene una eficiencia relativamente baja. La modificación de los parámetros geométricos de estos rotores, como la cantidad de palas, el número de etapas, la distancia de superposición o la relación de aspecto, entre otros [3], ha sido el aspecto principal de muchos estudios para mejorar su desempeño. Una técnica usada comúnmente para aumentar el rendimiento del rotor Savonius es añadir palas retorcidas, lo que crea el llamado rotor helicoidal Savonius (HSW por sus siglas en inglés). Además de tratar de mejorar la geometría de las palas, numerosos estudios han explorado el uso de dispositivos adicionales, como deflectores o inductores de viento, estos elementos tienen una superficie curva que se adapta a la circunferencia del rotor Savonius permitiendo que el aire entre directamente a la parte cóncava del mismo, que es donde se aprovecha mejor el efecto de arrastre y se reduce significativamente en la parte convexa evitando la desaceleración en el rotor, lo que se traduce en un aumento del coeficiente de potencia [4]. Teniendo en cuenta lo anterior, el presente trabajo de investigación se centra en evaluar numéricamente el efecto de un inductor de viento entrante en el rendimiento de un rotor HSW de dos palas mediante simulaciones computacionales utilizando el software CFD y la validación experimental en un túnel de viento, se explorarán diferentes configuraciones con el objetivo de mejorar el diseño y aumentar el coeficiente de potencia del rotor Savonius helicoidal.

Estado del Arte

El primer molino de viento reconocido se le atribuye a la región de Normandía en el año de 1180, se le denominó molino de poste. No hay una certeza si los primeros molinos de viento surgieron en China o Persia o si las ruedas de viento europeas, como se le conocía fueron más bien una invención influenciada por los chinos. Algunos autores dicen que los primeros molinos de viento fueron desarrollados en Egipto hace aproximadamente 3000 años cerca de Alejandría, sin embargo, sigue sin existir pruebas convincentes de esto [1]. A pesar de la dependencia energética producida por derivados del petróleo o carbón y el desarrollo de la energía atómica, resulta inminente el resurgimiento de la energía eólica. Actualmente, existen conflictos de intereses entre los defensores del medio ambiente y los conservadores, que opinan los hidrocarburos deben seguir siendo la principal fuente de energía. El crecimiento de la energía eólica ha traído también consigo el desarrollo de diferentes dispositivos capaces de producir energía haciendo uso del viento, uno de ellos son las turbinas eólicas de eje vertical. Existen diversos modelos de turbinas de eje vertical, sin embargo, en este estudio nos enfocaremos en el modelo Savonius, estas turbinas tienen excelentes prestaciones cuando se usan en entornos urbanos o lugares remotos, algunas de sus características sobresalientes son las siguientes: son de diseño simple, manufactura económica, un alto torque de arranque, la

capacidad de operar en flujos turbulentos y funcionamiento con vientos de baja velocidad. El uso que se les da a este modelo de turbinas, por lo tanto, es en zonas residenciales o zonas remotas donde se busca producir energía para bajas capacidades, algunas de sus aplicaciones son en iluminación, recarga de baterías de dispositivos electrónicos, bombeo de agua en sistemas de riego, torres de comunicación de zonas remotas y ventilación [3].

Una gran cantidad de estudios se han enfocado en mejorar las prestaciones de la turbina Savonius, por ejemplo Wenehenubun et al., 2015. determinaron que el número de palas más óptimo para el rotor Savonius son 2 palas, para el cual se obtuvo un rendimiento con una alta relación de velocidad de punta. La relación de velocidad de punta más alta es de 0,555 para una velocidad del viento de 7 m/s [4]. Por otro lado, Mahmoud et al., 2012 identifica que el rotor con placas en los extremos ofrece mayor eficiencia que los de sin placas terminales, así mismo los rotores de dos etapas tienen mayor rendimiento que los de una etapa [5]. Aun con estas modificaciones no ha sido suficiente para lograr extraer el máximo potencial de las turbinas Savonius, una nueva variante de diseño consiste en agregar un elemento al rotor que permite reducir las fuerzas de arrastre en la parte convexa de la pala, se le ha denominado de diferentes maneras por ejemplo Takenori Ogawa y Harou Yoshida., 1986 le llamaron placa deflectora [6], por otro lado, Altan B. y Atilgan M., 2008 le denominaron cortina para proteger el rotor en la parte convexa del rotor [7], en principio su función ha sido la misma y está comprobado que el coeficiente de potencia aumenta mediante el uso de este dispositivo. Adicional a esto, algunos estudios más recientes sugieren que el añadir un inductor al rotor de la turbina Savonius se puede alcanzar una mejora significativa del 15 al 30 por ciento en su coeficiente de potencia [5][46], en ese sentido el presente proyecto tiene la intención de desarrollar el diseño de un inductor que cumpla con la finalidad de mejorar las prestaciones aerodinámicas del rotor Savonius por medio de concentrar el flujo de aire en la pala cóncava del mismo aumentando el torque positivo y al mismo tiempo reducir las fuerzas de arrastre negativas que lo desaceleran, las cuales se presentan en su pala cóncava, logrando con esto el aumento de su potencia y, por lo tanto, su eficiencia, a fin de obtener resultados confiables se realizara el análisis CFD y su correspondiente validación experimental.

A continuación se presenta de manera más específica el enfoque desarrollado por algunos autores en el área de inductores y turbinas eólicas Savonius:

Ogawa y Yoshida (1986) realizaron un estudio experimental pionero publicado en el Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers (ahora JSME International Journal), titulado "The Effects of a Deflecting Plate and Rotor End Plates on Performances of Savonius-type Wind Turbine". Este trabajo muestra una de las primeras contribuciones en la literatura sobre el empleo de deflectores y placas para mejorar el rendimiento aerodinámico de los rotores Savonius [6].

Los autores investigaron en primer lugar el efecto de la geometría de las placas en cinco configuraciones diferentes de rotores Savonius: sin placas, con placas circulares, semicirculares y dos variantes elípticas inclinadas a 45° y 60° como se muestra en la figura (1). Mediante ensayos en túnel de viento, lograron encontrar que existe una forma óptima de placa de extremo (la elíptica con inclinación adecuada resultó muy efectiva), y revelaron un hallazgo clave: la contribución de la fuerza de sustentación al par neto del rotor es considerablemente mayor de lo que se asumía tradicionalmente en diseños basados puramente en arrastre. Este resultado obtenido por los autores fue innovador en su momento, ya que destacó que

el rendimiento del Savonius no depende exclusivamente del principio de arrastre diferencial, sino que componentes de sustentación generados en los bordes y en las placas de extremo juegan un papel importante en la producción de potencia. Posteriormente, los investigadores incorporaron un deflector plano posicionado frente al rotor, con el objetivo de redirigir el flujo hacia el álabe de avance y reducir la presión sobre el álabe de retorno. Los resultados experimentales demostraron un incremento en la potencia del rotor de aproximadamente 24 por ciento en comparación con la configuración sin deflector. Adicional, los autores destacaron la flexibilidad del deflector, probando que podía funcionar no solo como dispositivo de aumento de rendimiento, sino también como mecanismo de control de velocidad (limitador de sobrevelocidad en vientos fuertes) o como dispositivo de protección (reduciendo cargas excesivas sobre el rotor en condiciones de operación extremas).

La relevancia histórica de este trabajo en el campo de las turbinas eólicas Savonius es fundamental. Publicado en 1986, se encuentra entre las primeras investigaciones rigurosas que exploraron inductores externos (deflectores) y modificaciones en las placas de extremo, estableciendo una base experimental y sólida para el desarrollo posterior de estrategias de mejora en el rendimiento. Aunque el incremento reportado (24 por ciento) es moderado en comparación con algunos estudios más recientes (que alcanzan 30–50 por ciento con geometrías optimizadas por CFD), este estudio fue pionero ya que combina ambos elementos placas y deflectores en un análisis razonable, además identificando el rol importante de la sustentación, lo que influyó en diseños posteriores de deflectores de diferentes formas, por ejemplo curvos, porosos o aerodinámicos. Constituye, por tanto, una referencia principal y obligada en el estado del arte sobre inductores para rotores Savonius, especialmente para investigadores que buscan resaltar lo que es la evolución desde enfoques experimentales hasta simulaciones numéricas un poco más avanzadas.

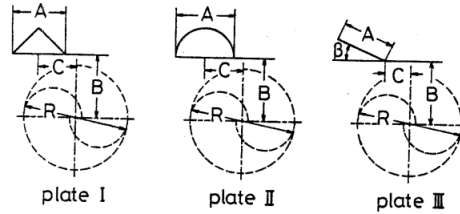


Figura 1: Diferentes Platos Deflectores [6]

Knutson (2009) presentó una patente (US2009/0191057A1) que describe un sistema innovador de turbina eólica multi-eje con velas concentradoras de potencia combinadas con varias turbinas Savonius alineadas axialmente. El diseño incluye estructuras externas (velas) que capturan y concentran el flujo de viento hacia los álabes activos de varios rotores Savonius dispuestos en serie, aumentando la densidad energética incidente (figura 2). Este enfoque representa uno de los primeros intentos patentados y formales de aplicar principios de concentración de flujo a configuraciones multietapa de Savonius, buscando superar las limitaciones de baja velocidad de viento típicas de entornos rurales o periurbanos.

Su importancia radica en proponer una arquitectura escalable que combina la robustez del Savonius con mecanismos pasivos de amplificación del flujo, sentando un precedente concep-

tual para posteriores desarrollos de sistemas híbridos o concentrados [25].

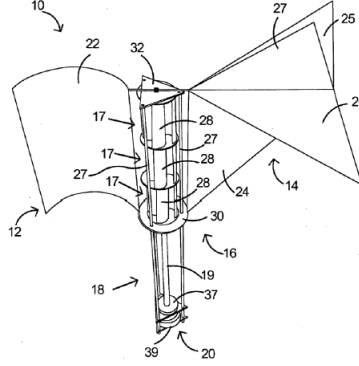


Figura 2: Turbina Savonius Multietapa con Inductor [25]

Altan y Atılgan (2010) desarrollaron y validaron experimentalmente un sistema de cortina como concentrador de flujo para un rotor Savonius convencional. La cortina, posicionada de una estratégica en una posición frente al rotor, protege el álabes de retorno de la presión directa del viento y canaliza el flujo hacia el álabes cóncavo de avance (figura 3), generando una aerodinámica significativa. Mediante ensayos en túnel de viento, los autores demostraron incrementos de hasta 38 por ciento en el coeficiente de potencia respecto al rotor sin cortina, con mejoras notables en el par estático y en el rango operativo. Este trabajo es clave en la literatura porque proporciona evidencia experimental clara del potencial de los dispositivos de concentración externos en turbinas Savonius de eje vertical, demostrando también su viabilidad práctica y su impacto directo en la eficiencia energética en condiciones reales [40].

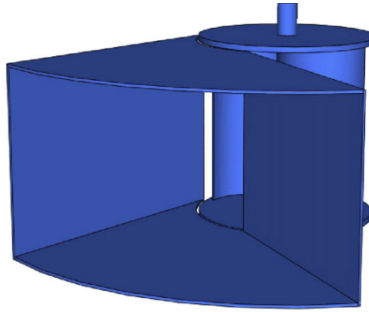


Figura 3: Diseño de Cortina [40]

Mohamed et al. (2010) realizaron un estudio numérico-experimental de optimización de un obstáculo que protege parcialmente el álabes de retorno en un rotor Savonius (figura 4). Utilizando simulaciones CFD validadas con ensayos, identificaron la geometría y posición óptima

del obstáculo para minimizar la resistencia aerodinámica negativa mientras se mantiene el flujo dirigido hacia el álabe de avance. Los resultados mostraron incrementos relativos en el coeficiente de potencia superiores al 27–40 por ciento (dependiendo del tip speed ratio), con par estático positivo en prácticamente todos los ángulos de azimutal, mejorando notablemente la capacidad de autoarranque. Este estudio se ha convertido en una referencia fundamental en el uso de obstáculos o deflectores para mitigar las pérdidas aerodinámicas inherentes al principio de funcionamiento por arrastre del rotor Savonius [2].

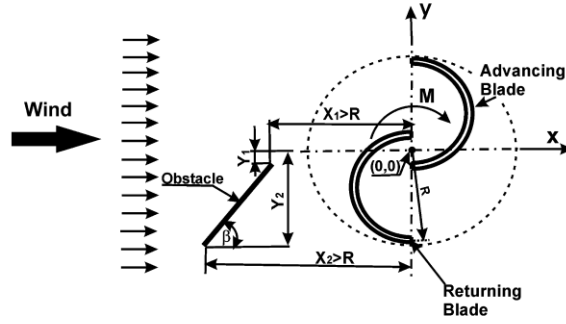


Figura 4: Placa Obstaculo [2]

Layeghman (2020) propusieron un deflector con perfil aerodinámico basado en un ala NACA 0012, colocado aguas arriba del rotor (figura 5). Mediante simulaciones CFD detalladas, analizaron el efecto del ángulo de ataque y la posición del deflector, demostrando que esta geometría reduce la separación de flujo en la zona de retorno y canaliza eficientemente el viento hacia el álabe cóncavo, incrementando el C_p hasta en un 50 por ciento en condiciones óptimas (especialmente alrededor de $TSR = 0.7-1.0$). Su relevancia radica en evidenciar que la aplicación de perfiles aerodinámicos avanzados en deflectores puede regular de una manera directa la asimetría de la fuerza de arrastre, ofreciendo mejoras superiores a las de deflectores planos convencionales [26].

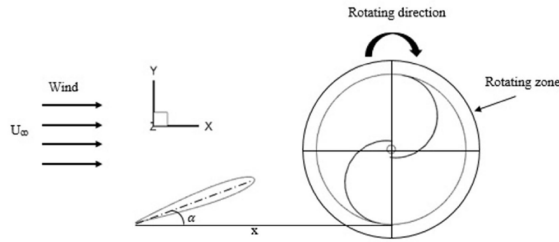


Figura 5: Inductor en Forma de Perfil Aerodinámico [26]

Nimvaria (2018) desarrollaron un deflector poroso que permite el paso parcial y controlado del

aire a través de su estructura (figura 6). Esta propuesta reduce las pérdidas por turbulencia y vórtices de gran escala detrás del deflector, mejorando la uniformidad y calidad del flujo incidente sobre el rotor. Los resultados numéricos indican mejoras sustanciales en el C_p sin incrementar excesivamente la resistencia estructural ni la complejidad constructiva. La importancia de este diseño reside en introducir la porosidad controlada como alternativa viable para optimizar el rendimiento aerodinámico, especialmente en aplicaciones donde se busca minimizar el impacto en la robustez mecánica del sistema [27].

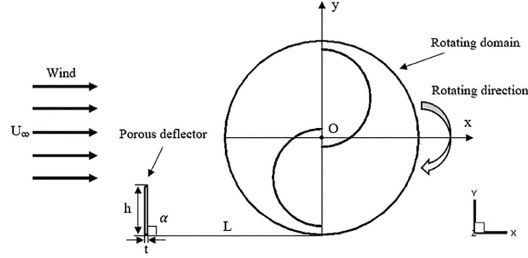


Figura 6: Inductor en Forma de Disco Poroso [27]

Tian (2022) investigaron un deflector pasivo posicionado aguas arriba del rotor Savonius, con la particularidad de que rota adaptativamente según la dirección del viento, preservando la dirección del sistema (figura 7). Mediante simulaciones CFD tridimensionales validadas, demostraron que esta configuración aumenta el C_p máximo en aproximadamente 25 por ciento, con un comportamiento estable en diferentes orientaciones de flujo. Este trabajo es significativo porque valida experimental y numéricamente la aplicación práctica de deflectores pasivos autoajustables en condiciones de campo real, acercando estas soluciones a implementaciones comerciales en entornos variables [28].

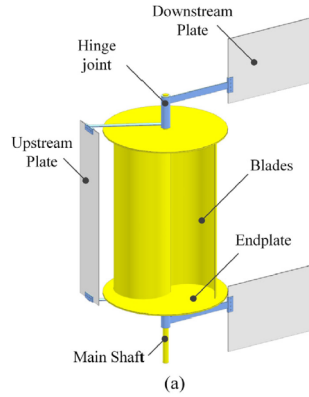


Figura 7: Inductor Pasivo

Lajnef et al. (2024) llevaron a cabo una investigación numérica y experimental del rendimien-

to de un rotor Savonius helicoidal equipado con un deflector de diseño novedoso. Utilizando CFD y validación experimental, mostraron mejoras significativas en el coeficiente de par y en la eficiencia energética global gracias a la optimización conjunta de la geometría helicoidal (que reduce fluctuaciones de par) y el deflector. Los resultados destacan incrementos notables en el C_p , abriendo nuevas líneas de diseño para turbinas Savonius de alto rendimiento en aplicaciones contemporáneas como microgeneración urbana o integración en edificaciones [46].

Los resultados clave demostraron que las nuevas formas de álabes generan mejoras significativas en los coeficientes de par C_t y de potencia C_p , así como en la eficiencia energética global. En particular, el rotor con álabes delta logró incrementar el coeficiente de potencia máximo en aproximadamente un 29,5 por ciento respecto al rotor helicoidal de referencia. Esta ganancia se atribuye principalmente a una mejor distribución del flujo alrededor de los álabes, a la reducción de las fluctuaciones de par instantáneo (característica ventajosa de la geometría helicoidal) y a una mayor asimetría en las fuerzas de arrastre entre el álabes de avance y el de retorno.

Como base de referencia para estos desarrollos, Saha et al. (2008) realizaron un estudio experimental exhaustivo en túnel de viento para determinar la configuración óptima del rotor Savonius, evaluando parámetros como número de etapas, relación de solapamiento, álabes semicirculares vs retorcidos y efecto del número de álabes. Esto se logró variando principalmente las dimensiones de altura y diámetro de los rotores Savonius como se muestra en la figura (8) donde D_r es el diámetro del rotor y h es la altura para cada etapa. Aunque no incorporaron inductores externos, sus resultados establecieron relaciones claras entre geometría del rotor y coeficiente de potencia (con C_p máximo alrededor de 0.15–0.20 para configuraciones óptimas), constituyendo una base fundamental para investigaciones posteriores que integran deflectores o concentradores, al definir los límites de rendimiento del rotor base y permitir comparaciones rigurosas [37].

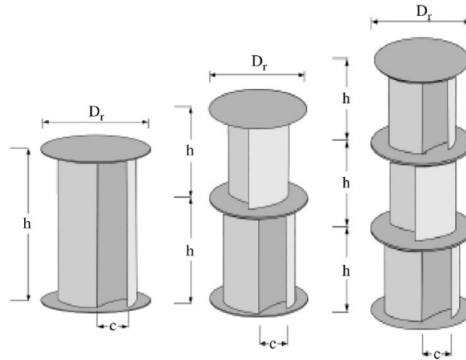


Figura 8: Etapas de Rotor Savonius [37]

Aboujaoude et al. (2023) realizaron un estudio numérico transitorio tridimensional mediante CFD sobre el efecto de un deflector axisimétrico direccional aplicado a un rotor Savonius convencional. El diseño del deflector, de forma cónica truncada simple y simétrica, concentra el flujo entrante hacia el álabes de avance mientras protege de manera efectiva el álabes de retorno en cualquier dirección del viento, preservando la direccionalidad inherente del rotor.

Los autores utilizaron técnicas avanzadas de simulación transitoria (con modelo SST k-) para evaluar diferentes ángulos de incidencia vertical y velocidades de viento variables, típicos de entornos urbanos turbulentos. Los resultados mostraron incrementos significativos en el coeficiente de potencia (C_p) de hasta 40–50 por ciento en comparación con el rotor sin deflector, con mejoras notables en el par estático y en la capacidad de autoarranque a bajas velocidades. La relevancia de esta contribución radica en proponer un deflector pasivo simple, de bajo costo y sin partes móviles que mantiene la direccionalidad, superando una limitación común de muchos deflectores direccionales previos. Este trabajo consolida la tendencia hacia soluciones omnidireccionales compactas, ideales para aplicaciones urbanas y de microgeneración en techos o entornos con dirección variable del viento [65].

Fatahian et al. (2022) propusieron un sistema innovador de deflector con cilindro rotatorio (rotating cylinder deflector) para turbinas Savonius de tipo arrastre. El diseño incorpora un cilindro estacionario en la zona de avance y un cilindro rotatorio controlado en la zona de retorno, generando un efecto Magnus que redirige el flujo de manera dinámica, reduce la presión negativa sobre el álabe convexo y minimiza la separación de flujo. Mediante simulaciones CFD detalladas (validadas experimentalmente en configuraciones similares), los autores demostraron mejoras en el coeficiente de potencia de aproximadamente 45–60 por ciento en rangos óptimos de TSR, junto con un aumento sustancial en el par estático y una reducción significativa de las fluctuaciones cíclicas. Este enfoque representa un avance hacia deflectores activos/pasivos híbridos, donde la rotación controlada del cilindro ofrece una adaptación fina al régimen de viento sin comprometer excesivamente la simplicidad mecánica. Su importancia en el estado del arte radica en introducir el principio de sustentación inducida por rotación (Magnus) en inductores para Savonius, abriendo una línea prometedora para diseños semi-activos que podrían superar las limitaciones de los deflectores estáticos convencionales en condiciones variables [66].

Idrissi et al. (2023) investigaron numéricamente el efecto de un sistema de deflectores cilíndricos dobles instalados frente al rotor Savonius. Un cilindro estacionario se posiciona delante del álabe de avance para canalizar y acelerar el flujo hacia la cara cóncava, mientras que el segundo cilindro protege selectivamente el álabe de retorno, reduciendo el torque negativo. Utilizando CFD con modelo de turbulencia k- realizable y validación con datos experimentales, los autores optimizaron la posición, separación y diámetro de los cilindros, logrando incrementos en el coeficiente de potencia de hasta 35–50 por ciento respecto al rotor base, con mejoras particularmente notables en el rango bajo de TSR y en el autoarranque. Este diseño destaca por su simplicidad geométrica y por demostrar que configuraciones multi-elemento cilíndricas pueden generar sinergias en la asimetría del campo de flujo sin requerir formas complejas. Su relevancia actual reside en ofrecer una alternativa robusta y de bajo costo a deflectores planos o porosos, especialmente útil en aplicaciones de baja velocidad de viento y entornos con turbulencia moderada, contribuyendo a la diversificación de estrategias de concentración de flujo en turbinas Savonius [67]. Los antecedentes revisados muestran un interés sostenido en el uso de deflectores, obstáculos y concentradores para mejorar el comportamiento aerodinámico de las turbinas Savonius. No obstante, la mayoría de los diseños se centran en configuraciones convencionales de eje vertical con álabes semicirculares, y aún existe una notable carencia de estudios que exploren inductores o deflectores optimizados específicamente para geometrías Savonius no convencionales o para aplicaciones de mayor eficiencia.

Antecedentes

Dentro del grupo de diseño al cual pertenece el autor de esta investigación, en el área de generación de energía mediante el recurso eólico, se han desarrollado diversos proyectos enfocados en la integración de inductores o concentradores de flujo para diferentes tipos de turbinas eólicas, de tamaños y formas variados. El objetivo común de estos trabajos ha sido concentrar el flujo de aire en una sección específica con el fin de mejorar las prestaciones aerodinámicas del rotor, por mencionar alguno tenemos el caso de; Christian Casillas [80] que desarrollo la inducción en turbinas eólicas de eje horizontal con palas de doble raíz con el objetivo de aprovechar al máximo la concentración de flujo, creando fuerzas de reacción debido a la cavidad existente entre las palas donde se da el efecto Venturi, complementado por una sustentación extra generada por la segunda pala adyacente a la principal mejorando considerablemente su desempeño en la fase de arranque y de operación, otro ejemplo es Carlos Alberto Arana [81] que hizo uso de una raíz extra en la pala de una turbina de eje vertical tipo Darrieus con la intención de mejorar su sustentación creando un efecto de inducción mejorando las prestaciones de la misma en el arranque, es decir en el momento en que la misma comienza a rotar, por otro lado Raúl et al. [82] al que mediante el uso de discos inductores para una turbina de eje vertical tipo H obtuvo un mejor desempeño concentrando el flujo de aire hacia las palas de la misma, tanto en la parte superior como en la inferior aprovechando al máximo el recurso eólico, así mismo el estudio desarrollado por Gerardo Javier Marín [83] enfocado en el análisis CFD de una turbina híbrida compuesta por un rotor Savonius y un rotor H, en el cual se lograron obtener mediante técnicas de modelos no estacionarios haciendo uso de sliding mesh y modelos de turbulencia K Omega SST resultados congruentes cercanos a los reportados en la literatura. Son variadas las investigaciones en el área con la intención, sin embargo, hasta la fecha no se han reportado antecedentes de inductores o deflectores diseñados específicamente para turbinas Savonius dentro del grupo, por lo que el presente proyecto representa la primera iniciativa en este sentido.

Marco Teórico

El aprovechamiento de la energía eólica se remonta a siglos atrás cuando su función era principalmente para realizar actividades cotidianas enfocadas en la agricultura se les conoció como molinos de viento; sin embargo, la llegada de los combustibles fósiles para producir energía significó la decadencia y abandono de estos mecanismos. Algunos autores establecen que los primeros molinos de viento fueron desarrollados en Egipto hace aproximadamente 3000 años cerca de Alejandría; sin embargo, sigue sin existir pruebas convincentes de este hecho. Información confiable reconoce la existencia de molinos de viento en el año 644 en la región persa-afgana de Seistán; sin embargo, el primer molino de viento verificable se le adjudica a la región de Normandía, en el año de 1180 se le denominó molino de poste. No hay certeza si los primeros molinos de viento vinieron de China o Persia o si las ruedas de viento europeas no fueron más que una invención influenciada por los chinos; sin embargo, para el siglo XIII varios molinos de poste fueron instalados en la región de Alemania. Los primeros molinos de viento eran hechos de palos de bambú y velas de tela. El molino de viento holandés alcanzo la perfección en el siglo XIX como característica principal, la torre giraba junto con la rueda. En Europa el molino de viento de poste tuvo una gran influencia, ya que su uso perduro por muchos años, a pesar de que surgieron algunas otras alternativas de molino más sofisticadas, no fueron capaz de desplazarlo. El poste principal o caballete, como también se le conoce, es el elemento principal del molino, en el descansa toda la estructura, además de ser el

elemento sobre el que se produce el giro del mismo.

Historia del desarrollo de las turbinas eólicas.

Molinos de viento y ruedas de viento.

La historia, evolución y la importancia económica y técnica de los molinos de viento y su relación con el uso de la energía eólica, la cual no es una tecnología nueva, sino más bien el resurgimiento, pues desde tiempo atrás ha sido un recurso muy utilizado. Los molinos de viento y las ruedas de viento han existido durante siglos, pero fueron opacados por el acceso barato a combustibles fósiles como el carbón y el petróleo. Sin embargo, en la actualidad las energías basadas en el consumo de combustibles fósiles y la energía nuclear han producido contaminación y alto riesgo, por lo cual el resurgimiento de la energía eólica parece ser un hecho casi inevitable. Es necesario resaltar que el recuerdo por el uso de los molinos de viento no resolverá los problemas energéticos futuros, pero el hecho de mirar al pasado puede proporcionar lecciones valiosas en el resurgimiento del uso del recurso eólico. A comienzos del siglo XX, los pioneros de la energía eólica ya habían logrado éxitos importantes en la generación de electricidad, aunque sus logros fueron poco mencionados principalmente por el desarrollo de la electricidad convencional producida por fuentes de carbón.

Tipos de molinos europeos.

A lo largo de la historia, varios tipos de molinos existieron, desde los primitivos molinos de eje vertical hasta los más avanzados de eje horizontal. Entre los más destacados estaban:

- Molinos de poste. Este tipo de molino se encontraba sujeto sobre un poste central de madera alrededor del cual toda la estructura giraba para orientarse hacia el viento. Estos molinos se utilizaban exclusivamente para moler grano y eran comunes en el centro y norte de Europa. Sus velas estaban cubiertas de tela o madera y la orientación hacia el viento se lograba mediante una cola que ayudaba a girar la estructura con la ayuda de una cuerda y poleas.
- Molinos de poste hueco. Fueron desarrollados en Holanda, estos molinos fueron una evolución de los molinos de poste. A diferencia del diseño original, estos molinos tenían una base fija, generalmente en forma de pirámide, y solo la parte superior rotaba con el viento. Estos molinos eran utilizados para el drenaje de tierras, lo que fue crucial para la recuperación de tierras en los Países Bajos.
- Molinos de torre. Típicos del Mediterráneo, estos molinos se construyeron en torno a torres de piedra con un eje horizontal. Los molinos de torre requerían reposicionarse manualmente hacia el viento, y se usaron principalmente en el sur de Europa.
- Molinos holandeses. Estos molinos surgieron en Holanda en el siglo XVI y marcaron una mejora significativa sobre los molinos de poste y torre. Con una estructura fija en la base y una capota móvil donde se montaba el rotor, estos molinos permitieron la construcción de estructuras más grandes y más eficientes, permitiendo con esto el aumento de la capacidad de trabajo.
- Molinos Paltrock. Este tipo de molino eran menos conocidos, fueron utilizados principalmente en la industria de la madera para aserrar y moldear grandes troncos. Tenían una característica sobresaliente y es que su diseño permitía girar toda la estructura sobre ruedas, y eran comunes en Holanda en los siglos XVI y XVII.

Importancia económica de los molinos de viento.

Los molinos de viento desempeñaron un papel importante en la economía europea, especialmente en la molienda de grano, una actividad vital para las comunidades agrícolas. En muchos países, los derechos de viento eran tan importantes como los derechos de agua, y los molinos estaban sujetos a estrictas leyes que regulaban su construcción y operación. Se introdujeron conceptos como la obligación de moler, que de alguna manera les exigía a los campesinos molieran su grano exclusivamente en el molino asignado por el señor feudal, y las "prohibiciones de construcción de molinos" que limitaban el número de molinos en una región. En los Países Bajos, los molinos también fueron esenciales para el drenaje de tierras. Durante el siglo XV, los holandeses comenzaron a construir diques y a utilizar molinos para drenar. A mediados del siglo XIX, solo en los Países Bajos había más de 9,000 molinos de viento, y en Alemania se contaban más de 20,000.

Desarrollo técnico y científico de los molinos.

El desarrollo de los molinos de viento, desde la Edad Media hasta el siglo XVII, no se basó en investigación, sino más bien en mejoras empíricas. Los avances importantes llegaron después con los científicos del periodo conocido como Renacimiento, uno de dichos científicos fue Leonardo da Vinci y otros ingenieros que propusieron diseños más sofisticados de molinos. A partir del siglo XVIII, con el surgimiento de la física y matemática, científicos como Gottfried Wilhelm Leibniz, Daniel Bernoulli y Leonhard Euler realizaron contribuciones significativas. Bernoulli aplicó las leyes básicas de la mecánica de fluidos al diseño de las aspas de los molinos, mientras que Euler calculó el giro adecuado para las aspas. Por otro lado, en Gran Bretaña, los inventores Meikle y Lee introdujeron innovaciones como el uso de aspas de muelle, que permitían regular la velocidad y la potencia de los molinos automáticamente. A mediados del siglo XIX, los molinos alcanzaron su punto máximo de desarrollo, especialmente en Holanda y Gran Bretaña, donde se convirtieron en máquinas de buena eficiencia enfocadas para varios usos industriales.

La decadencia de los molinos y el auge de la electrificación.

Al final del siglo XIX el uso del motor de vapor y la distribución de la electricidad, marcó el comienzo del declive de los molinos de viento. A pesar de que todavía se construían molinos hasta el siglo XX, la electricidad en las áreas rurales hizo que los molinos de viento se volvieran obsoletos. En 1943, solo quedaban 1,400 molinos en Holanda, y en Alemania, apenas unos 400. Aunque los molinos de viento dejaron de ser competitivos frente a las nuevas tecnologías, hoy en día muchos molinos han sido restaurados como patrimonio cultural. Este renacimiento refleja la creciente apreciación de la importancia histórica y técnica de estos antiguos generadores de energía.

Recurso Eólico

Producción eléctrica a partir del viento.

Este capítulo se centra en la transición de los molinos de viento tradicionales a las turbinas eólicas modernas, las cuales son diseñadas para la generación de electricidad. La electricidad urbana se desarrolló relativamente rápido en el siglo XIX, las áreas rurales siguieron en espera, eso se debió a la dificultad y el costo de establecer redes eléctricas en zonas remotas, durante este período surgieron los primeros experimentos para generar electricidad mediante energía eólica. Hubo un personaje

representativo en el desarrollo de la eólica, su nombre Poul La Cour de origen Danés, él fue un pionero que transformó el uso de la energía eólica aplicando los principios científicos a la construcción de molinos para generar electricidad. En 1891 construyó una turbina eólica experimental en la escuela llamada Askov esta turbina estaba diseñada para generar electricidad utilizando una dínamo. Además de generar electricidad por medio de una turbina eólica, también se enfocó en buscar una manera de almacenar la energía, utilizando el fenómeno conocido como electrólisis para convertir la electricidad en hidrógeno y almacenarlo para después usarlo en lámparas de gas. Además, adicional a todo lo anterior también estableció una estación de pruebas de turbinas en la región de Askov, donde hizo varios experimentos en un túnel de viento que él mismo había construido. Por medio del uso de este dispositivo logro optimizar el diseño de las aspas y mejorar la eficiencia de las turbinas. Este científico mejoró por mucho la tecnología de los molinos de viento tradicionales y se convirtió en uno de los primeros en comercializar sus turbinas eólicas. Para 1908, su compañía ya había construido 72 turbinas eléctricas basadas en su diseño, estas turbinas suministraban energía a varias áreas rurales en Dinamarca, aunque la producción de estas turbinas disminuyó tras la Primera Guerra Mundial; sin embargo, durante el periodo de la Segunda Guerra Mundial, el aumento de los precios de los combustibles reavivó el interés por la energía eólica.

Grandes proyectos de turbinas en Dinamarca y Alemania.

Durante la Segunda Guerra Mundial, la compañía F. L. Smidth de Dinamarca desarrolló turbinas con rotores aerodinámicos avanzados que eran capaces de generar hasta 50 kW de electricidad. Este tipo de turbinas estaban tecnológicamente avanzadas para su época, ya que tenían rotores de dos palas hechos de madera laminada y diseñados para operar a altas velocidades. Por otro lado, en Alemania, Kurt Bilau que era un hombre retirado del ejército, también trabajó en el desarrollo de turbinas eólicas más eficientes. Bilau diseñó un rotor de cuatro aspas, conocido como el ventimotor, este dispositivo utilizaba perfiles aerodinámicos modernos para mejorar la eficiencia. Aunque sus ideas eran innovadoras, algunos de sus cálculos resultaron incorrectos, específicamente en su intento de superar el límite teórico de conversión de energía eólica establecido por Albert Betz en 1920. Albert Betz, fue un físico alemán, tuvo un papel crucial en el desarrollo de la teoría de la energía eólica. En 1920 demostró que solo el 59.3 por ciento de la energía del viento puede ser convertida en electricidad por una turbina de viento. Este límite teórico se le conoce actualmente como el límite de Betz y sigue siendo la base de la ingeniería moderna de turbinas eólicas.

Los primeros intentos de generar electricidad a gran escala.

Uno de los proyectos más ambiciosos de la época fue desarrollado por Hermann Honnef, fue un ingeniero alemán que propuso la construcción de torres eólicas gigantescas con múltiples rotores. Cada rotor tendría un diámetro de 160 metros y generaba 20,000 kW de electricidad. Era técnicamente viable; sin embargo, este proyecto nunca se llevó a cabo debido a la complejidad y el costo. En Estados Unidos, el ingeniero Palmer Cosslett Putnam construyó la primera turbina eólica a gran escala en Vermont en 1941, la turbina tenía un diámetro de rotor de 53.3 metros y una potencia nominal de 1,250 kW. Esta fue la primera turbina conectada a la red eléctrica pública, y funcionó durante cuatro años, su operación se vio interrumpida por una falla en una de las palas del rotor. El proyecto de Putnam demostró el potencial de las turbinas eólicas para generar electricidad a gran escala, pero también mostró los desafíos técnicos y económicos a los que se enfrentaba esta tecnolo-

gía en sus primeras etapas. A pesar de sus logros, los altos costos de construcción y mantenimiento impidieron que el proyecto tuviera un impacto significativo en el mercado de las turbinas eólicas

Turbinas eólicas en los años 50 antes de la crisis energética.

Tras la Segunda Guerra Mundial, el precio del petróleo disminuyó y la energía eólica perdió importancia. A pesar de esto, algunos proyectos experimentales siguieron. En 1950, la compañía John Brown construyó una turbina de 100 kW en las Islas Orcadas, pero su éxito fue limitado. Otro proyecto innovador fue el de Andreau-Enfield, que utilizaba un sistema de transmisión neumática en lugar de un generador mecánico convencional, pero su eficiencia era demasiado baja para ser económicamente viable. En Francia, se desarrollaron varios proyectos importantes, como la turbina Best-Romani en 1958, que tenía un diámetro de rotor de 30.1 metros y una potencia de 800 kW. Aunque estas turbinas tuvieron un rendimiento aceptable, fueron desmanteladas en la década de 1960 debido a la falta de interés en la energía eólica por parte de las empresas de servicios públicos. En Dinamarca, el ingeniero J. Juul construyó una turbina de 200 kW en Gedser en 1957, que se mantuvo operativa hasta 1966. A pesar de ser desmantelada, esta turbina fue restaurada en 1977 como parte de un programa de investigación de la NASA, y se convirtió en un modelo clave para el desarrollo de la energía eólica moderna.

El renacimiento de la energía eólica.

La crisis del petróleo de 1973 marcó un punto de cambio en la historia de la energía eólica. Con el aumento repentino del precio del petróleo, los países occidentales comenzaron a buscar fuentes alternativas de energía, lo que aumentó el interés en la energía renovable. En Estados Unidos, la NASA fue designada para liderar el desarrollo de nuevas tecnologías eólicas, y en 1973 se lanzó el programa de energía eólica. En Europa, específicamente en Dinamarca, Suecia y Alemania, se realizaron importantes inversiones en investigación y desarrollo de la energía eólica. En Dinamarca, la turbina de Gedser fue rehabilitada y se instalaron nuevas turbinas experimentales. En Suecia, se construyeron turbinas de hasta 3 MW de potencia como parte de un programa de diez años. En Alemania, se llevó a cabo el proyecto Growian, que pretendía construir una turbina de 3 MW, pero que fue criticado porque sufrió varios problemas técnicos. El recurso eólico constituye uno de los pilares fundamentales para el desarrollo de energías renovables. Este recurso, basado en el aprovechamiento del movimiento del aire, presenta una variabilidad inherente tanto temporal como espacial, lo que lo convierte en un fenómeno complejo y desafiante de modelar. La energía disponible en el viento varía con el cubo de su velocidad, lo que subraya la importancia de comprender sus características para optimizar su aprovechamiento en turbinas, determinar la viabilidad de sitios potenciales y evaluar su impacto en redes eléctricas.

Variabilidad del viento.

La variabilidad del viento puede clasificarse en escalas geográficas y temporales, cada una con implicaciones directas en el diseño y operación de sistemas eólicos. La distribución de velocidades del viento está influenciada por factores como la latitud, la topografía y la cobertura vegetal. Por ejemplo, las regiones montañosas suelen experimentar velocidades más altas debido a efectos de aceleración del flujo, mientras que los valles actúan como barreras naturales que reducen su intensidad.

Temporal: Las fluctuaciones en el tiempo abarcan desde escalas anuales hasta segundos. En escalas largas, se observan patrones estacionales predecibles, mientras que en escalas cortas predominan turbulencias caóticas que desafían las predicciones convencionales.

Espectro del viento.

El espectro del viento, como lo describe Van der Hoven (1957), identifica tres picos principales: Variaciones sinópticas con ciclos de días, asociadas a sistemas climáticos de alta y baja presión. Cambios diurnos ligados al ciclo térmico diario de la atmósfera. Turbulencias en escalas de segundos o minutos, de alta frecuencia y relevancia para el diseño de turbinas.

- Variaciones sinópticas (ciclos de días): Estas variaciones están asociadas con sistemas meteorológicos de gran escala, como los sistemas de alta y baja presión (anticiclones y ciclones), que tienen ciclos temporales de varios días (generalmente de 2 a 7 días, correspondientes a frecuencias de aproximadamente 0.01 a 0.1 ciclos por hora). Este pico en el espectro refleja el paso de frentes climáticos y sistemas meteorológicos que afectan regiones extensas. En el contexto de la energía eólica, estas variaciones son cruciales para la planificación de la generación de energía a medio plazo, ya que afectan la disponibilidad de viento en escalas de días. Por ejemplo, los modelos de predicción meteorológica utilizan estas variaciones para estimar la producción de parques eólicos. Según el libro *Wind Energy Explained* de Manwell et al. (2010) [14], las variaciones sinópticas son un factor clave para la integración de la energía eólica en las redes eléctricas.
- Cambios diurnos (ciclo térmico diario): Descripción: Este pico corresponde a variaciones en la velocidad del viento con un periodo de aproximadamente 24 horas, ligado al ciclo térmico diario de la atmósfera. Estas fluctuaciones están asociadas a procesos como el calentamiento y enfriamiento de la superficie terrestre debido a la radiación solar, que genera cambios en la estabilidad atmosférica y en los vientos locales. En el diseño de turbinas eólicas, los cambios diurnos son importantes para optimizar la operación de los parques eólicos, ya que la velocidad del viento puede variar significativamente entre el día y la noche. Según un estudio de Burton et al. [79], estas variaciones deben considerarse para la predicción de la generación de energía en escalas horarias.
- Turbulencias de alta frecuencia (escalas de segundos a minutos): Descripción: Este pico en el espectro corresponde a fluctuaciones rápidas en la velocidad del viento, con periodos de segundos a minutos (frecuencias de 0.1 a 100 ciclos por hora). Estas variaciones son causadas por la turbulencia atmosférica, que puede ser generada por obstáculos orográficos, estructuras, o inestabilidades locales en la capa límite. Para el diseño de turbinas eólicas, las turbulencias de alta frecuencia son críticas, ya que generan cargas dinámicas en las palas y estructuras de las turbinas. Estas cargas pueden causar fatiga y desgaste, afectando la vida útil de los componentes. Según la norma IEC 61400-1 (Wind turbines – Part 1: Design requirements), las turbinas deben diseñarse para soportar las cargas inducidas por estas turbulencias, lo que requiere un análisis detallado del espectro de viento en el sitio de instalación.

Factores geográficos y climáticos.

El viento es impulsado principalmente por diferencias en el calentamiento solar de la superficie terrestre. Este desequilibrio genera movimientos de aire a gran escala modulados por la rotación de

la Tierra y la topografía local. Los movimientos de aire a gran escala, generados por diferencias en el calentamiento solar y modulados por la rotación terrestre y la topografía local, determinan las características del viento que una turbina Savonius debe aprovechar. El diseño del inductor debe optimizarse para operar eficientemente en entornos con vientos de baja velocidad y alta turbulencia, comunes en áreas urbanas o regiones con topografía compleja.

Efectos topográficos y térmicos.

Topografía

Las colinas y montañas aceleran el flujo del viento debido a la combinación de efectos altitudinales y canalización del flujo. En regiones montañosas, el viento experimenta una aceleración al ascender por las laderas debido a la reducción del área transversal del flujo de aire, un fenómeno descrito como el efecto Venturi. Este efecto ocurre porque el aire, al ser comprimido en un espacio más estrecho, aumenta su velocidad para conservar la masa, según el principio de continuidad en dinámica de fluidos (Barry, 2008). Además, las crestas de las montañas pueden generar turbulencias orográficas o vientos catabáticos cuando el aire frío desciende por la pendiente, especialmente en condiciones nocturnas o en climas fríos.

Efectos costeros.

Las diferencias térmicas entre el agua y la tierra generan brisas marinas durante el día y brisas terrestres por la noche, patrones relevantes en zonas como California.

- **Brisas Marinas (Día):** Durante el día, la tierra se calienta más rápido que el océano debido a su menor capacidad térmica. Esto crea una zona de baja presión sobre la tierra y una de alta presión sobre el agua, generando un flujo de aire desde el mar hacia la costa (Simpson, 1994). En regiones como California, estas brisas marinas son intensas debido a la combinación de aguas frías (por corrientes como la de California) y tierras cálidas, lo que resulta en vientos consistentes de 5-10 m/s, ideales para aplicaciones eólicas.
- **Brisas Terrestres (Noche):** Por la noche, el proceso se invierte: la tierra se enfría más rápido que el océano, creando un flujo de aire desde la tierra hacia el mar. Estos patrones son predecibles y cíclicos, lo que los hace valiosos para la planificación de sistemas eólicos en zonas costeras.
- **Altitud:** En regiones de alta elevación, el aire frío puede descender hacia las planicies, generando vientos fuertes y estratificados.

Variaciones Estadísticas del Viento.

El análisis estadístico es clave para caracterizar el comportamiento del viento en un sitio específico, utilizando distribuciones como la Weibull para modelar su variabilidad, aunque otras distribuciones como la de Rayleigh (un caso especial de Weibull) o la distribución lognormal también pueden emplearse en ciertos contextos.

- **Distribución de Weibull.** Es ampliamente usada para modelar la velocidad del viento debido a su flexibilidad para ajustarse a diferentes patrones de datos. Su función de densidad de probabilidad es:

$$f(v; k, \lambda) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{v}{\lambda} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{\lambda} \right)^k} \quad (1)$$

Donde V es la velocidad, k es el parametro de forma que describe la variabilidad de las velocidades del viento (típicamente entre 1.5 y 3 para datos de viento) y λ es el parametro de escala relacionado con la velocidad promedio del viento y permite escalar la distribución. Aplicaciones: Evaluación del potencial eólico para turbinas, predicción de extremos (vientos fuertes o ráfagas), modelado de series temporales de viento.

- Distribución de la Dirección del Viento. La dirección del viento suele modelarse con distribuciones circulares, como la distribución de von Mises, debido a su naturaleza angular (0° a 360°). Su función de densidad es:

$$f(\theta; \mu, \kappa) = \frac{e^{\kappa \cos(\theta - \mu)}}{2\pi I_0(\kappa)} \quad (2)$$

θ : dirección del viento (en radianes).

μ : dirección media del viento.

κ : parámetro de concentración, cuanta más concentradas están las direcciones alrededor de μ).

I_0 : función de Bessel modificada de orden cero.

- Otros modelos estadísticos Distribución de Rayleigh: Simplificación de Weibull cuando $k = 2$. Es adecuada para lugares con vientos estables y sin grandes variaciones. Distribución lognormal: Usada en casos donde las velocidades del viento tienen una cola pesada (eventos extremos más probables). Modelos mixtos: En sitios con múltiples regímenes de viento (monzones o brisas marinas), se usan distribuciones mixtas de Weibull o modelos no paramétricos.

Componentes estacionales.

Los componentes estacionales del viento reflejan cómo las variaciones climáticas y meteorológicas a lo largo del año influyen en los patrones de velocidad y dirección del viento. En función de la región geográfica, estas influencias estacionales tienen características distintas.

- Latitudes templadas. Gradientes de presión más pronunciados: Durante el invierno, las diferencias de temperatura entre masas de aire (e.g., aire frío polar y aire cálido subtropical) generan gradientes de presión más intensos. Esto impulsa sistemas de baja presión (cyclones extratropicales) y frentes que producen vientos más fuertes y variables.
- Regiones tropicales. En los trópicos, los patrones estacionales están dominados por fenómenos específicos:
- Monzones: En regiones como el sur de Asia, los monzones de verano traen vientos fuertes y sostenidos debido al cambio estacional en los gradientes de presión entre el océano y el continente. Por ejemplo, el monzón del suroeste en India genera vientos húmedos y constantes desde el océano Índico.
- Tormentas ciclónicas: Los huracanes, tifones o ciclones tropicales, más frecuentes en ciertas estaciones (e.g., verano y otoño en el Atlántico), producen vientos extremos. Estos eventos se reflejan en las colas pesadas de las distribuciones estadísticas (e.g., Weibull o lognormal) debido a las ráfagas intensas.

Modelado estadístico estacional.

- Ajuste por estaciones: Los parámetros de las distribuciones (e.g., Weibull para velocidad, von Mises para dirección) varían según la estación. Por ejemplo, en latitudes templadas, el parámetro de escala c de Weibull puede ser mayor en invierno, mientras que en regiones monzónicas, el parámetro de forma k puede ser más alto en la temporada de monzones debido a vientos más consistentes.
- Series temporales: Los datos de viento suelen descomponerse en componentes estacionales (usando métodos como Fourier o análisis de series temporales) para identificar patrones cíclicos anuales o semestrales.
- Rosas de viento estacionales: Estas gráficas muestran cómo las direcciones y velocidades predominantes cambian entre estaciones. Por ejemplo, en invierno en latitudes templadas, las rosas de viento pueden mostrar una mayor frecuencia de vientos del oeste, mientras que en regiones monzónicas, las direcciones cambian drásticamente entre estaciones.

Naturaleza de la turbulencia.

La turbulencia, caracterizada por fluctuaciones rápidas de la velocidad del viento, es un fenómeno generado por:

- Fricción con la superficie terrestre (turbulencia mecánica): La interacción del viento con obstáculos físicos en la superficie, como montañas, colinas, bosques, edificios o incluso pequeñas irregularidades del terreno, genera perturbaciones en el flujo de aire. Estas perturbaciones pueden manifestarse como remolinos o vórtices que alteran la uniformidad del viento. La rugosidad de la superficie terrestre desempeña un papel clave. Por ejemplo, un terreno liso como un desierto produce menos turbulencia que una zona montañosa o una ciudad con edificios altos. En la capa límite atmosférica (la región más cercana al suelo, generalmente hasta 1-2 km de altura), la fricción reduce la velocidad del viento cerca de la superficie y crea gradientes verticales de velocidad (cizalladura del viento), que son una fuente común de turbulencia. Ejemplo: En un valle estrecho, el viento puede acelerarse y formar remolinos al pasar por los bordes de las montañas, generando turbulencia significativa.
- Efectos térmicos (turbulencia térmica o convectiva): Las variaciones en la temperatura de la superficie terrestre, causadas principalmente por la radiación solar, generan diferencias de densidad en el aire. El aire cálido, menos denso, tiende a ascender, mientras que el aire frío, más denso, desciende, formando celdas convectivas. Estas corrientes ascendentes y descendentes pueden ser intensas, especialmente en días soleados sobre superficies que se calientan rápidamente, como asfalto, campos secos o desiertos. Las nubes cúmulos son un indicador visual de este tipo de turbulencia, ya que se forman en las corrientes ascendentes de aire cálido. La turbulencia térmica es más común durante el día, cuando el calentamiento solar es más intenso, y tiende a disminuir por la noche, cuando la superficie se enfría. Ejemplo: En un día caluroso, un piloto de planeador puede experimentar ascensos y descensos bruscos al atravesar corrientes térmicas sobre un campo agrícola.

Intensidad de la turbulencia.

Se define como la relación entre la desviación estándar (σ) y la velocidad media ($\bar{U}$):

$$I = \frac{\sigma}{\bar{U}}. \quad (3)$$

Factores como la rugosidad del terreno y la altura influyen en su magnitud, siendo relevante para el diseño estructural de turbinas.

Perfiles de velocidad.

Los perfiles de velocidad del viento describen cómo la velocidad del viento aumenta con la altura sobre la superficie terrestre, influenciada por factores como la fricción, la rugosidad del terreno y las condiciones atmosféricas. Los dos modelos más comunes son el perfil logarítmico y el perfil de potencia, cada uno con aplicaciones específicas según el tipo de terreno y las condiciones.

- Perfil Logarítmico. El perfil logarítmico describe el aumento de la velocidad del viento con la altura en función de la rugosidad del terreno y la estabilidad atmosférica. Se basa en la teoría de la capa límite atmosférica y es más preciso en condiciones de flujo neutro (sin fuertes efectos térmicos).

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (4)$$

$u(z)$: Velocidad del viento a la altura z .

u_* : Velocidad de fricción, relacionada con la tensión de cizalladura del viento.

κ : Constante de von Kármán (aproximadamente 0.4).

z_0 : Longitud de rugosidad, que depende del tipo de terreno (e.g., 0.0002 m para agua, 0.03 m para césped, 1 m para áreas urbanas).

- Perfil de Potencia El perfil de potencia es una aproximación empírica que describe la variación de la velocidad del viento con la altura mediante una ley de potencia. Es más simple que el perfil logarítmico y se usa frecuentemente en ingeniería eólica, especialmente en terrenos complejos.

$$u(z) = u_{\text{ref}} \left(\frac{z}{z_{\text{ref}}} \right)^\alpha \quad (5)$$

Donde:

- $u(z)$: Velocidad del viento a la altura z , es decir, el valor que se desea estimar.
- u_{ref} : Velocidad del viento de referencia medida a una altura conocida.
- z : Altura a la cual se quiere calcular la velocidad del viento.
- z_{ref} : Altura de referencia donde se midió la velocidad u_{ref} .
- α : Exponente de la ley de potencia, que depende de la rugosidad del terreno y describe cómo varía la velocidad del viento con la altura.

Predicción y Pronóstico del Viento; Métodos Estadísticos.

Modelos ARMA.

ARMA (AutoRegressive Moving Average, autoregresivo-media móvil) y su extensión ARMAX (AutoRegressive Moving Average with Exogenous, autoregresivo-media móvil con variables exógenas) son herramientas estadísticas ampliamente utilizadas en el análisis y predicción de series temporales. Estos modelos son particularmente valiosos en aplicaciones donde se requiere modelar datos secuenciales con patrones temporales, como en la predicción de generación de energía en parques eólicos [69]. A continuación, se describe en detalle cada modelo, sus componentes, aplicaciones, ventajas, limitaciones y consideraciones prácticas.

Un modelo ARMA(p , q) combina dos componentes principales: Autorregresivo (AR): Modela la relación entre una observación actual y un número finito de observaciones pasadas (rezagos). La parte AR(p) se define como:

$$X_t = \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \cdots + \phi_p X_{t-p} + \epsilon_t \quad (6)$$

donde ϕ_i son los coeficientes autorregresivos, X_{t-i} son los valores pasados y ϵ_t es un término de error (ruido blanco, con media 0 y varianza constante). Media Móvil (MA): Modela la dependencia entre una observación actual y un número finito de errores pasados. La parte MA(q) se define como:

$$X_t = \epsilon_t + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \theta_2 \epsilon_{t-2} + \cdots + \theta_q \epsilon_{t-q} \quad (7)$$

donde θ_i son los coeficientes de media móvil y ϵ_{t-i} son los errores pasados. La combinación de ambos da la ecuación completa de un modelo ARMA(p , q):

$$X_t = \phi_1 X_{t-1} + \cdots + \phi_p X_{t-p} + \epsilon_t + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \cdots + \theta_q \epsilon_{t-q} \quad (8)$$

Aquí, p es el orden del componente AR y q es el orden del componente MA.

Modelo ARMAX.

El modelo ARMAX(p , q , b) extiende el ARMA al incorporar variables exógenas (variables externas que influyen en la serie temporal). La ecuación general es:

$$X_t = \phi_1 X_{t-1} + \cdots + \phi_p X_{t-p} + \beta_1 Z_{1,t} + \beta_2 Z_{2,t} + \cdots + \beta_b Z_{b,t} + \epsilon_t + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \cdots + \theta_q \epsilon_{t-q} \quad (9)$$

donde: $Z_{i,t}$ son las variables exógenas en el tiempo t .

β_i son los coeficientes que miden el impacto de cada variable exógena. El resto de los términos son idénticos al modelo ARMA. Las variables exógenas permiten capturar influencias externas que no están modeladas por los componentes AR o MA. Por ejemplo, en un parque eólico, las variables exógenas podrían incluir:

- Velocidad del viento.
- Dirección del viento.
- Presión atmosférica.
- Temperatura.

- Humedad.

Ventaja principal: ARMAX mejora la precisión al considerar factores externos, lo que lo hace más robusto para aplicaciones donde las series temporales están influenciadas por variables medibles.

Aplicación en Parques Eólicos.

En el contexto de parques eólicos, los modelos ARMA y ARMAX se utilizan principalmente para predicciones a corto plazo (de horas a días) de la generación de energía. La producción de energía eólica depende en gran medida de la velocidad y dirección del viento, que son variables estocásticas pero con patrones temporales que pueden modelarse [68]. Uso de ARMA: Si solo se dispone de datos históricos de la generación de energía (sin variables externas), un modelo ARMA puede capturar patrones autorregresivos (por ejemplo, la generación de ayer influye en la de hoy) y dependencias de errores pasados. Esto es útil para predicciones simples basadas únicamente en la serie temporal de producción [69]. Uso de ARMAX: En parques eólicos, es más común usar ARMAX, ya que la generación de energía está fuertemente correlacionada con variables meteorológicas. Un modelo ARMAX podría predecir la potencia generada en las próximas 6 horas usando los datos de potencia de las últimas 24 horas y las previsiones meteorológicas para las próximas 6 horas.

Diseño y Supervivencia de Turbinas.

Condiciones Extremas.

El diseño de turbinas eólicas debe garantizar su operatividad y durabilidad bajo condiciones extremas, considerando tanto fenómenos meteorológicos severos como requisitos normativos internacionales. Este documento aborda las principales condiciones extremas, las normativas aplicables y las estrategias de diseño, respaldadas por fuentes confiables.

Ráfagas Extremas y Gradientes Abruptos.

Las ráfagas extremas generan cargas dinámicas significativas en las palas, el rotor y la torre de la turbina, mientras que los gradientes abruptos de viento (variaciones rápidas en velocidad según la altura o dirección) inducen esfuerzos asimétricos que pueden acelerar la fatiga estructural. Para mitigar estos efectos, se emplean las siguientes estrategias:

- Sistemas de control activo: Los sistemas de control de paso (pitch control) ajustan dinámicamente el ángulo de las palas para minimizar las cargas inducidas por ráfagas [70].
- Materiales avanzados: Compuestos de fibra de carbono o vidrio ofrecen mayor resistencia y flexibilidad, reduciendo el riesgo de fallo estructural.
- Simulaciones aerodinámicas: Herramientas como Computational Fluid Dynamics (CFD) permiten modelar el comportamiento de las turbinas bajo ráfagas extremas, optimizando su diseño [71].

Normativas Internacionales.

La normatividad en el diseño y certificación de turbinas eólicas constituye un elemento esencial para garantizar la seguridad estructural, la fiabilidad operativa y la durabilidad a lo largo de su vida útil proyectada, usualmente de 20 años o más. Estas normas internacionales permiten estandarizar los criterios de diseño frente a cargas extremas, fatiga, turbulencia y condiciones ambientales adversas, minimizando riesgos.

La serie **IEC 61400** de la International Electrotechnical Commission (IEC) representa el marco de referencia internacional más ampliamente aceptado para sistemas de generación eólica. La norma principal, **IEC 61400-1** (edición 4.0:2019, con correcciones e interpretaciones incorporadas hasta 2025), establece los requisitos fundamentales de diseño para turbinas eólicas de cualquier tamaño, con especial énfasis en máquinas de gran y mediana escala conectadas a la red.

Esta norma define las clases de sitio (I, II, III, junto con extensiones para ciclones tropicales y alta turbulencia), modela condiciones extremas de viento —tales como ráfagas operativas extremas (EOG), cambios de dirección extremos (EDC) y el modelo de viento extremo (EWM)— con períodos de retorno de 50 años, y especifica los casos de carga de diseño (DLC) junto con los correspondientes factores de seguridad parciales.

Enfoque de normatividad en turbinas de eje vertical (VAWT) y tipo Savonius.

Las turbinas de eje vertical (VAWT), entre las que se encuentran las de tipo **Savonius** (caracterizadas por su principio de resistencia aerodinámica, comportamiento omnidireccional, elevado par de arranque y buena respuesta en flujos altamente turbulentos), no cuentan con una norma exclusiva dentro de la serie IEC 61400.

La gran mayoría de VAWT, particularmente aquellas de baja capacidad instaladas en entornos urbanos o de recurso eólico moderado a bajo, se rigen por la **IEC 61400-2** (edición 3.0:2013), norma específica para *small wind turbines* (turbinas pequeñas, definidas usualmente por un área barrida del rotor $\leq 200 \text{ m}^2$ o potencias inferiores a aproximadamente 100 kW).

Esta norma presenta una aproximación simplificada en comparación con la IEC 61400-1, adaptada a las particularidades de las turbinas pequeñas: menor complejidad en los casos de carga, inclusión de una clase IV adicional (para sitios de muy bajo recurso eólico), mayor énfasis en entornos turbulentos cercanos al suelo y metodologías más accesibles económicamente para la evaluación de diseño y pruebas.

Las turbinas Savonius, a pesar de su menor eficiencia aerodinámica respecto a otras VAWT de sustentación (como Darrieus o híbridos H-rotor), se benefician precisamente de esta norma al operar en condiciones donde la aplicación directa de la IEC 61400-1 resultaría excesivamente conservadora o económicamente inviable. Complementariamente, se aplican otras partes de la serie, tales como la IEC 61400-12-1 (medición de rendimiento energético, con anexo específico para *small wind*), IEC 61400-11 (ruido acústico) e IEC 61400-24 (protección contra rayos).

En la tabla (2) se presenta un resumen de las principales normas aplicables en el diseño y certificación de turbinas eólicas, con énfasis en su ámbito de aplicación y propósito principal:

En conjunto, estas normas proporcionan un marco coherente y actualizado que soporta el desarrollo técnico y la implementación segura de tecnologías eólicas, incluyendo soluciones de eje vertical en aplicaciones distribuidas y de nicho.

Tabla 2: Principales normas IEC 61400 aplicables a turbinas

Norma	Edición	Ámbito principal
IEC 61400-1	4.0:2019	Turbinas grandes y medianas
IEC 61400-2	3.0:2013	Turbinas pequeñas ($\leq 200 \text{ m}^2$)
IEC 61400-12-1	2017/2022	Rendimiento energético
IEC 61400-11	3.0	Ruido acústico
IEC 61400-24	1.0	Protección contra rayos

Aerodinámica de las Turbinas Eólicas de Eje Vertical.

Las turbinas eólicas de eje vertical son dispositivos diseñados para extraer energía cinética del viento y transformarla en energía mecánica. Este proceso implica una desaceleración del flujo de aire dentro de un tubo de corriente que atraviesa el rotor, lo que resulta en una expansión del flujo aguas abajo. El equilibrio energético se logra mediante una disminución de la energía cinética y un aumento transitorio de la presión estática en el disco del rotor. Son dispositivos que convierten la energía cinética del viento en energía mecánica mediante la rotación de palas alrededor de un eje perpendicular al suelo. A diferencia de las turbinas de eje horizontal (HAWT), las VAWT presentan ventajas únicas, como su capacidad omnidireccional y su adaptabilidad a entornos con vientos turbulentos. La comprensión de estos fenómenos es fundamental para optimizar el diseño y funcionamiento de las turbinas eólicas, maximizando su eficiencia y adaptabilidad a diversas condiciones atmosféricas.

La rotación de las VAWT resulta de la interacción entre el flujo de aire y las palas, que genera dos tipos principales de fuerzas:

- Sustentación (Lift): En algunas turbinas de eje vertical la diferencia de presión entre las caras superior e inferior de la pala, debido al flujo de aire, produce una fuerza perpendicular al viento relativo. Esta fuerza impulsa la rotación cuando el ángulo de ataque es óptimo.
- Arrastre (Drag): En turbinas Savonius, el viento empuja directamente las palas, creando una fuerza paralela al flujo. La diferencia de arrastre entre los lados cóncavo y convexo genera el torque. La ecuación de la fuerza aerodinámica total F sobre una pala se expresa como:

$$F = \frac{1}{2} \rho A V_r^2 (C_l \mathbf{e}_l + C_d \mathbf{e}_d) \quad (10)$$

Donde:

ρ : Densidad del aire.

A : Área de la pala.

V_r : Velocidad relativa del viento.

C_l : Coeficiente de sustentación.

C_d : Coeficiente de arrastre.

$\mathbf{e}_l, \mathbf{e}_d$: Vectores unitarios en las direcciones de sustentación y arrastre.

Parámetros Aerodinámicos

Relación de Velocidad de Punta (TSR)

La relación de velocidad de punta (λ) se define como:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_{\infty}} \quad (11)$$

Donde:

ω : Velocidad angular de la turbina.

R : Radio de la turbina.

V_{∞} : Velocidad del viento incidente. Las turbinas Savonius tienen valores de $\lambda < 1$, o cercanos a este lo que limita su eficiencia [22].

Este parámetro determina el ángulo de ataque relativo del flujo sobre las palas, influyendo directamente en el coeficiente de potencia (C_p) y el coeficiente de torque (C_t). El C_p presenta un máximo en un valor óptimo de TSR específico para cada diseño de turbina, ya que valores bajos permiten que parte del viento pase sin interactuar con las palas (baja extracción de energía), mientras que valores altos generan turbulencia excesiva y comportamiento como un disco sólido, incrementando el arrastre inútil [32].

En turbinas eólicas modernas de eje horizontal (HAWT) de alta eficiencia, el TSR óptimo oscila entre 6 y 8, permitiendo alcanzar C_p cercanos a 0.45-0.50, valores que se aproximan al límite de Betz (0.593) gracias a su operación basada en fuerzas de sustentación [14].

En contraste, las turbinas Savonius (de eje vertical y tipo arrastre, drag-type) operan con TSR significativamente inferiores, típicamente inferiores a 1, debido a que su mecanismo de conversión energética depende principalmente de la diferencia de fuerzas de arrastre entre las caras cóncava (avanzante) y convexa (retornante) de las palas. Esto implica que la velocidad periférica del rotor no puede superar sustancialmente la velocidad del viento, limitando el TSR máximo y el C_p asociado [31][32]. Los valores típicos de TSR óptimo (donde se alcanza el C_p máximo) para rotores Savonius convencionales se sitúan entre 0.8 y 1.0, con C_p máximos en el rango de 0.15-0.25 [39]. Configuraciones optimizadas (como palas helicoidales, solapamiento adecuado o modificaciones geométricas) pueden elevar ligeramente el TSR óptimo hasta 1.0-1.2 y el C_p hasta 0.30-0.35 [48].

La relación con el límite de Betz es indirecta: aunque este límite teórico aplica universalmente, las Savonius operan lejos de él (alcanzando solo el 25-60 por ciento del C_p máximo teórico) precisamente por su restricción en TSR cercanos a 1, que impide velocidades relativas altas necesarias para una extracción eficiente basada en sustentación [49]. Esta limitación inherente prioriza ventajas como alto torque de arranque y autoarranque en bajos TSR, haciendo las Savonius ideales para aplicaciones de baja velocidad y turbulencia, aunque sacrificando eficiencia global.

Ángulo de ataque (α).

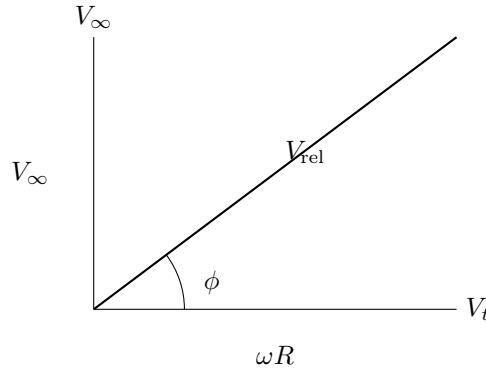
El ángulo de ataque (denotado comúnmente como α) es el ángulo formado entre la dirección del flujo de aire relativo (velocidad aparente del viento respecto al álabe en movimiento) y la línea de referencia del álabe o perfil aerodinámico. En perfiles alares convencionales (como en turbinas Darrieus o de eje horizontal), esta línea de referencia es la cuerda del perfil (línea que une el borde

de ataque con el borde de salida). En el caso de las turbinas eólicas de eje vertical tipo Savonius, donde los álabes son cucharas semicilíndricas o curvas (no perfiles alares aerodinámicos clásicos), el ángulo de ataque se define de manera análoga como el ángulo entre la dirección del viento relativo y la dirección tangencial o de avance del álabes (o la línea que conecta el centro del cilindro con el borde de ataque de la cuchara) [32][51]. Este varía cíclicamente durante la rotación debido a la geometría de la VAWT, se calcula como:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{V_{\infty} \sin \theta}{\omega R + V_{\infty} \cos \theta} \right) \quad (12)$$

Donde θ es la posición azimutal de la pala, V es la velocidad del viento libre, θ es el ángulo azimutal del álabes (posición angular durante la rotación), ω es la velocidad angular del rotor, r es el radio del rotor.

A continuación se muestra el triángulo de velocidades que permitirá identificar de manera visual las componentes de velocidad:



Triángulo de velocidades en una turbina eólica de eje vertical (VAWT).

Donde:

- $V_t = \omega R$: Velocidad tangencial de la pala, donde ω es la velocidad angular del rotor y R es el radio de la turbina.
- V_{∞} : Velocidad del viento libre (flujo no perturbado que llega a la turbina).
- V_{rel} : Velocidad relativa del viento respecto a la pala, resultante de la combinación vectorial entre V_t y V_{∞} .
- ϕ : Ángulo entre la velocidad tangencial V_t y la velocidad relativa V_{rel} .
- α : Ángulo de ataque, definido como el ángulo entre la cuerda del perfil aerodinámico y la dirección de V_{rel} .

- $\lambda = \frac{\omega R}{V_\infty}$: Tip Speed Ratio (TSR), que representa la relación entre la velocidad de la pala y la velocidad del viento.

Solidez (σ).

El coeficiente de solidez (o simplemente solidez, denotado comúnmente como σ en turbinas eólicas es un parámetro geométrico adimensional que representa la relación entre el área proyectada o "sólida" de los álabes (o cucharas) y el área barrida total por el rotor. En el contexto de turbinas de eje vertical (VAWT), la solidez se define de manera general como:

$$\sigma = \frac{n \cdot c}{D}$$

donde:

n es el número de álabes (cucharas o palas), c es la cuerda o ancho efectivo del álabe (en Savonius, típicamente el diámetro de la semicircunferencia o la proyección equivalente), D es el diámetro del rotor (o diámetro barrido).

En algunos casos, para rotores Savonius convencionales, se interpreta también como la fracción del área frontal ocupada por las cucharas respecto al área barrida, lo que resulta en valores altos (frecuentemente cercanos a 1 o superiores en configuraciones de dos cucharas con solapamiento) [32]. Se define como:

$$\sigma = \frac{NcR}{A_s} \quad (13)$$

Donde:

N : Número de palas.

c : Cuerda de la pala.

A_s : Área barrida por la turbina. Una solitud alta mejora el arranque, pero reduce la velocidad máxima y la eficiencia aerodinámica [24].

Coficiente de Potencia (C_p).

El coeficiente de potencia (C_p) en turbinas eólicas representa la eficiencia aerodinámica del rotor, definido como la relación entre la potencia mecánica extraída por la turbina y la potencia cinética disponible en el viento que incide sobre el área de barrido del rotor. Matemáticamente, se expresa como:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A_s V_\infty^3} \quad (14)$$

donde P es la potencia extraída, ρ la densidad del aire, A el área de barrido y v la velocidad del viento libre [14][31]. Este parámetro constituye un indicador clave del rendimiento de cualquier turbina eólica, independientemente de su configuración (eje horizontal o vertical).

En 1919, el físico alemán Albert Betz derivó teóricamente el límite máximo de C_p , conocido como límite de Betz, estableciendo que ninguna turbina eólica puede extraer más del 59.3 por ciento (exactamente $16/27 \approx 0.593$) de la energía cinética del viento en un flujo libre e incompresible [47][14].

Este límite surge de la aplicación de los principios de conservación de masa y momento lineal a un modelo ideal de disco actuador, demostrando que la extracción total de energía detendría el flujo, impidiendo el paso continuo de aire a través del rotor [53].

En la práctica, las turbinas eólicas reales alcanzan valores de C_p inferiores al límite de Betz debido a pérdidas aerodinámicas, mecánicas y eléctricas, con eficiencias típicas entre 0.35 y 0.50 para turbinas de eje horizontal comerciales modernas [14]. En el caso particular de las turbinas Savonius (de eje vertical y tipo arrastre), el C_p presenta valores significativamente inferiores debido a su principio de operación predominantemente basado en fuerzas de arrastre, que genera torque negativo en la pala retornante y limita la velocidad periférica del rotor (generalmente TSR inferiores a 1). Los valores típicos de C_p máximo para rotores Savonius convencionales oscilan entre 0.15 y 0.25, con reportes experimentales y numéricos que indican máximos alrededor de 0.18-0.21 en configuraciones clásicas de dos o tres palas [31][32]. Modificaciones geométricas (como palas helicoidales, solapamiento optimizado o perfiles modificados) y dispositivos de augmentación (deflectores, cortinas o guías de flujo) permiten elevar el C_p hasta 0.30-0.35 en casos optimizados, aunque raramente superan 0.40 incluso en configuraciones híbridas o con accesorios [38].

Estos valores representan aproximadamente el 25-60 por ciento del límite de Betz, reflejando las limitaciones inherentes del diseño por arrastre, pero compensadas por ventajas como alto torque de arranque y robustez en flujos turbulentos. La relación con el límite de Betz es fundamental: aunque este límite aplica universalmente a cualquier turbina eólica, las Savonius operan lejos de él debido a su mecanismo de conversión energética, priorizando simplicidad y autoarranque sobre máxima eficiencia [32]. En el contexto metodológico de diseño y evaluación experimental, el C_p sirve como métrica principal para comparar el rendimiento del prototipo con referencias teóricas y empíricas, justificando selecciones realistas de potencia y dimensiones.

Coefficiente de Momento (C_m).

El coeficiente de momento (también conocido como coeficiente de torque o coeficiente de par, denotado comúnmente como C_m o C_t) en turbinas eólicas es un parámetro adimensional que cuantifica el torque aerodinámico generado por el rotor en relación con las fuerzas dinámicas del viento incidente. Se define matemáticamente como:

$$C_m = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A_s R V_\infty^2} \quad (15)$$

donde T es el torque (N·m), ρ la densidad del aire (kg/m³), A_s el área barrida (m²) y V_∞ la velocidad del viento (m/s). Está relacionado con el coeficiente de potencia (C_p) por:

$$C_p = C_m \cdot \lambda \quad (16)$$

donde λ es la relación de velocidad de punta (TSR). El C_m evalúa el rendimiento en diferentes regímenes, siendo crítico para el arranque. Las turbinas Savonius tienen un C_m elevado a bajos TSR, facilitando el autoarranque [50].

En las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) tipo Savonius, el coeficiente de momento adquiere una importancia particular debido al principio de funcionamiento basado principalmente en la

fuerza de arrastre (drag).

El C_m en rotores Savonius es clave por las siguientes razones:

- Capacidad de autoarranque: Estas turbinas destacan por su alto torque estático y dinámico a bajas velocidades de viento y bajas λ (generalmente $\lambda < 1$), lo que les permite iniciar la rotación sin asistencia externa, incluso en vientos turbulentos o de baja velocidad. Un C_m elevado y positivo en todas las posiciones angulares asegura un arranque fiable, reduciendo fluctuaciones y evitando "puntos muertos".
- Operación en entornos urbanos o de baja velocidad: A diferencia de las turbinas de eje horizontal (HAWT), las Savonius no requieren orientación al viento y operan eficientemente en flujos irregulares. Sin embargo, su C_p máximo es bajo (típicamente 0.15-0.25, frente al 0.45-0.50 de HAWT), por lo que maximizar el C_m es esencial para mejorar el torque inicial y la producción en regímenes de bajo λ , donde el torque negativo de la cuchara retornante puede reducir el rendimiento.
- Variabilidad angular: El torque en Savonius varía cíclicamente con la posición azimutal, pudiendo generar torque negativo en ciertas orientaciones. Un diseño optimizado busca mantener $C_m > 0$ en todo el ciclo, mejorando la estabilidad y la eficiencia global.

Coefficientes de Fuerza Normal y Tangencial (C_n , C_t).

Los coeficientes de fuerza normal (C_n) y tangencial (C_t) representan las componentes de las fuerzas aerodinámicas en las direcciones normal y tangencial al movimiento de la pala. Los coeficientes son:

$$C_n = C_l \cos \alpha + C_d \sin \alpha \quad (17)$$

$$C_t = C_l \sin \alpha - C_d \cos \alpha \quad (18)$$

donde C_l es el coeficiente de sustentación, C_d el de arrastre, y α el ángulo de ataque (rad). Las fuerzas son:

$$F_n = \frac{1}{2} \rho c V_r^2 C_n, \quad F_t = \frac{1}{2} \rho c V_r^2 C_t \quad (19)$$

donde c es la cuerda de la pala (m). La fuerza tangencial genera el torque, mientras que la normal contribuye a las cargas estructurales. Son esenciales en modelos como Blade Element Momentum [52].

Número de Reynolds (Re).

El número de Reynolds es un parámetro adimensional fundamental en dinámica de fluidos que permite caracterizar el régimen de flujo (laminar, transitorio o turbulento) alrededor de cuerpos inmersos en un fluido, como es el caso de las palas de aerogeneradores de eje vertical (VAWT, por sus siglas en inglés). En el contexto aerodinámico, el número de Reynolds se define como:

$$Re = \frac{\rho V_r D}{\mu} \quad (20)$$

donde:

- ρ es la densidad del aire (kg/m^3), - μ es la viscosidad dinámica del aire ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), - V_r es la velocidad relativa del flujo sobre el perfil (m/s), - D es una longitud característica, que en el caso de un rotor puede tomarse como el diámetro del rotor o la cuerda del perfil, según el análisis que se realice.

Este número adimensional compara las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas en el flujo. Valores bajos de Re indican que las fuerzas viscosas son dominantes y el flujo tiende a ser laminar, mientras que valores altos de Re implican predominio de las fuerzas inerciales y una mayor propensión a la transición y a la turbulencia [54][55].

En aerodinámica de perfiles, el número de Reynolds tiene un efecto directo sobre los coeficientes de sustentación (C_l) y arrastre (C_d), así como sobre la posición de la transición de la capa límite de laminar a turbulenta y la posible separación del flujo [56]. A bajos Re , la capa límite suele ser predominantemente laminar, más sensible a las perturbaciones externas y con mayor tendencia a la separación temprana, lo que provoca una reducción de la sustentación y un aumento relativo del arrastre. A medida que el número de Reynolds aumenta, la transición a flujo turbulento en la capa límite se adelanta, generalmente mejorando la adherencia del flujo al perfil y reduciendo el riesgo de separación temprana, lo que se traduce en mayores coeficientes de sustentación máxima y, en muchos casos, mejores relaciones C_l/C_d [57].

En el caso de los aerogeneradores de eje vertical (VAWT), el número de Reynolds es especialmente relevante porque las palas experimentan condiciones de flujo altamente no estacionarias, con variaciones continuas de ángulo de ataque y velocidad relativa durante cada revolución. Típicamente, las VAWT de pequeña y mediana escala operan en rangos de Re entre 10^4 y 10^6 , dependiendo del tamaño del rotor, la velocidad del viento y la cuerda de las palas [58]. Este intervalo de Reynolds se asocia a lo que suele denominarse régimen de Reynolds bajos o moderados, donde los efectos viscosos, la transición laminar-turbulenta y la separación intermitente del flujo tienen un papel dominante en el comportamiento aerodinámico.

La sensibilidad de los perfiles aerodinámicos empleados en VAWT a este rango de Re implica que pequeñas variaciones en la velocidad del viento, la rugosidad superficial de las palas o en la geometría del perfil pueden provocar cambios significativos en los coeficientes C_l y C_d . En consecuencia, la eficiencia aerodinámica del rotor, su coeficiente de potencia (C_p) y su capacidad de arranque dependen demasiado del número de Reynolds. Por ejemplo, a Re relativamente bajos ($\sim 10^4$ – 10^5) muchos perfiles sufren pérdidas importantes de sustentación y un incremento del arrastre, lo que reduce el rendimiento global del rotor; a Re más altos dentro del rango operativo ($\sim 10^5$ – 10^6) se observan generalmente mejores prestaciones aerodinámicas y mayores valores de C_p [59].

Además, en las VAWT la variación del ángulo azimutal de ataque provoca fenómenos de desprendimiento dinámico de la estela (dynamic stall), cuya intensidad y características dependen de Re . A valores de Reynolds más elevados, el desprendimiento dinámico puede generar picos de sustentación pero también mayores cargas no estacionarias sobre las palas, influyendo tanto en el rendimiento como en los esfuerzos estructurales.

Por todo lo anterior, la correcta selección del perfil aerodinámico, la cuerda de la pala y la escala del rotor debe considerar explícitamente el rango de número de Reynolds en el que operará la VAWT, así como las variaciones de Re asociadas a las condiciones reales de viento (tabla 3). Esto es fundamental para lograr un diseño que optimice la eficiencia aerodinámica, el comportamiento en arranque y la durabilidad estructural del aerogenerador.

Tabla 3: Clasificación de los regímenes de flujo según el número de Reynolds

Régimen de flujo	Número de Reynolds (Re)	Tipo de flujo
Laminar	$Re < 2000$ –2300	Ordenado, capas paralelas
Transición	2000–2300 Re 4000	Inestable, transición
Turbulento	$Re > 4000$	Caótico, remolinos intensos

Los valores límites exactos (especialmente entre laminar y transición) pueden variar ligeramente según la geometría y las condiciones de entrada.

Relación de Inducción Axial (a).

La relación de inducción axial describe la disminución de la velocidad del viento en el plano del rotor como consecuencia de la extracción de energía cinética por parte de la turbina. En términos de la teoría de cantidad de movimiento para las turbinas eólicas, se define la velocidad en el plano de la turbina como:

$$V = V_{\infty}(1 - a) \quad (21)$$

donde:

- V_{∞} es la velocidad libre de corriente, lejos de la influencia de la turbina, - V es la velocidad promedio del flujo en el plano del rotor, - a es el factor de inducción axial.

El factor de inducción axial a representa la fracción de reducción de la velocidad con respecto a la velocidad libre. Valores típicos de diseño para turbinas de alta eficiencia se sitúan aproximadamente en $a \approx 1/3$, cercano a la condición teórica de Betz para máxima extracción de potencia [60]. A valores más altos de a , el flujo tiende a separarse y la teoría de cantidad de movimiento simple deja de ser válida, por lo que se requieren correcciones empíricas o modelos avanzados.

La inducción axial tiene una influencia directa en la distribución del flujo alrededor del rotor y, por tanto, en las fuerzas aerodinámicas que aparecen sobre las palas. Una mayor inducción (mayor a) implica una reducción más significativa de la velocidad local, lo que modifica el ángulo de ataque, el valor de la sustentación y el arrastre, así como los esfuerzos estructurales en la turbina [60]. Este acoplamiento entre aerodinámica y dinámica del flujo hace que el cálculo preciso de a sea esencial para:

- Estimar con mayor certeza la potencia capturada y el rendimiento global de la turbina.
- Predecir correctamente las cargas cíclicas y de fatiga sobre las palas, especialmente relevantes en turbinas de eje vertical.
- Modelar la estela, es decir, la región de flujo desacelerado aguas abajo del rotor, que condiciona la interacción entre turbinas en un parque eólico.

La estela, caracterizada por una reducción de velocidad y un aumento de la turbulencia, se origina precisamente en la extracción de energía asociada a a . Modelos de estela, tanto para turbinas de eje horizontal como vertical, utilizan el factor de inducción axial como parámetro importante para describir la evolución de la pérdida de velocidad y la expansión de la estela con la distancia aguas abajo [61]. Una definición adecuada de esta dinámica es fundamental para la optimización del diseño

de parques eólicos, donde las pérdidas por estela pueden suponer una fracción significativa de la pérdida de producción energética.

En resumen, el factor de inducción axial a y la relación $V = V_\infty(1 - a)$ constituyen elementos centrales en los modelos aerodinámicos de turbinas eólicas. Su correcta determinación, ya sea mediante teoría de cantidad de movimiento, métodos de elemento de pala o modelos como el Double Multiple Streamtube, es crucial para predecir el comportamiento aerodinámico, las cargas estructurales y las pérdidas por estela en el diseño y operación de turbinas eólicas modernas.

Modelos de Turbulencia.

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una herramienta esencial para modelar flujos turbulentos en aplicaciones de ingeniería, como el diseño de turbinas eólicas, vehículos y estructuras. La turbulencia, caracterizada por su comportamiento caótico y fluctuaciones en velocidad y presión, requiere modelos específicos para su simulación precisa. A continuación se presenta una categorización de los modelos de turbulencia utilizados en CFD, desde los basados en ecuaciones de Navier-Stokes promediadas (RANS) hasta simulaciones de alta resolución como LES y DNS. Se describen los modelos más comunes, sus ecuaciones fundamentales, ventajas, limitaciones y aplicaciones, respaldados por referencias confiables. La turbulencia es un fenómeno complejo en flujos de fluidos, caracterizado por fluctuaciones aleatorias en velocidad, presión y otras propiedades. En dinámica de fluidos computacional (CFD), los modelos de turbulencia permiten simular estos flujos sin resolver directamente todas las escalas temporales y espaciales, lo que sería computacionalmente difícil de realizar en la mayoría de los casos. Los modelos de turbulencia se clasifican según su enfoque para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, desde métodos simplificados basados en promedios estadísticos hasta simulaciones detalladas que resuelven las estructuras turbulentas más pequeñas [72].

Categorización de los Modelos de Turbulencia.

Los modelos de turbulencia en CFD se dividen en tres categorías principales según su nivel de detalle y costo computacional:

1. RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)

Basados en el promedio temporal o estadístico de las ecuaciones de Navier-Stokes, modelan todas las escalas turbulentas mediante suposiciones empíricas. Son los más utilizados en aplicaciones industriales debido a su bajo costo computacional.

2. LES (Large Eddy Simulation)

Resuelve directamente las escalas grandes de la turbulencia y modela las escalas pequeñas mediante un modelo de submallado. Ofrece mayor precisión que RANS, pero es más costoso.

3. DNS (Direct Numerical Simulation):

Resuelve todas las escalas turbulentas sin modelado, utilizando las ecuaciones de Navier-Stokes completas. Es extremadamente precisa, pero su costo computacional la limita a investigacio-

nes fundamentales.

Híbridos como DES (Detached Eddy Simulation) combinan RANS y LES para equilibrar precisión y costo. A continuación, se describen los modelos más representativos de cada categoría.

Modelos RANS.

Los modelos RANS promedian las ecuaciones de Navier-Stokes para obtener ecuaciones de transporte para las cantidades medias, introduciendo términos adicionales (tensiones de Reynolds) que deben modelarse [72].

Ecuaciones de Navier-Stokes.

para un flujo incompresible son:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (22)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (23)$$

donde $\mathbf{u}$ es la velocidad, p la presión, ρ la densidad, μ la viscosidad dinámica y $\mathbf{f}$ las fuerzas externas. Al promediar, se descompone la velocidad en una componente media ($\bar{\mathbf{u}}$) y una fluctuante ($\mathbf{u}'$): $\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}'$. Esto introduce las tensiones de Reynolds ($-\rho \overline{u'_i u'_j}$) en las ecuaciones promediadas:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (24)$$

Los modelos RANS modelan estas tensiones de Reynolds mediante suposiciones empíricas.

Modelo Spalart-Allmaras.

El modelo Spalart-Allmaras es un modelo de una ecuación que resuelve una variable de viscosidad turbulenta ($\tilde{\nu}$) para estimar la viscosidad eddy (ν_t). Es ampliamente utilizado en aplicaciones aerodinámicas debido a su simplicidad y robustez [74].

La ecuación de transporte para $\tilde{\nu}$ es:

$$\frac{\partial(\rho \tilde{\nu})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \tilde{\nu} u_j)}{\partial x_j} = c_{b1} \tilde{S} \rho \tilde{\nu} - c_{w1} f_w \rho \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 + \frac{1}{\sigma} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \rho \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right] + \frac{c_{b2}}{\sigma} \rho \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \quad (25)$$

donde $\tilde{S}$ es una función del vortice, d la distancia a la pared, y $c_{b1}, c_{w1}, c_{b2}, \sigma$ son constantes empíricas.

Ventajas: Bajo costo computacional, bueno para flujos con capas límite y separación suave.

Limitaciones: Menos preciso en flujos con separación masiva o efectos tridimensionales complejos.

Modelo $k - \epsilon$.

El modelo $k - \epsilon$ es un modelo de dos ecuaciones que resuelve la energía cinética turbulenta (k) y la tasa de disipación (ϵ). Es adecuado para flujos completamente turbulentos [72]. Las ecuaciones de transporte son:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (26)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (27)$$

donde $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ es la viscosidad turbulenta, P_k la producción de energía turbulenta y $C_\mu, C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ son constantes.

Ventajas: Robusto para flujos industriales, como tuberías y canales.

Limitaciones: Poco preciso cerca de paredes y en flujos con separación.

Modelo $k - \omega$.

El modelo $k - \omega$ resuelve la energía cinética turbulenta (k) y la frecuencia específica de disipación (ω). Es más preciso cerca de paredes y en flujos con gradientes adversos [72]. Las ecuaciones son:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \beta^* \rho k \omega \quad (28)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 \quad (29)$$

donde $\mu_t = \rho \frac{k}{\omega}$, y $\alpha, \beta, \beta^*, \sigma_k, \sigma_\omega$ son constantes.

Ventajas: Mejor comportamiento en capas límite y flujos con separación.

Limitaciones: Sensible a las condiciones iniciales y menos robusto en flujos libres.

Modelo SST (Shear Stress Transport)

El modelo SST combina $k - \epsilon$ y $k - \omega$, utilizando $k - \omega$ cerca de paredes y $k - \epsilon$ en regiones de flujo libre, con una función de mezcla para una transición suave [72]. Combina las ecuaciones de $k - \omega$ con términos adicionales para la mezcla, incluyendo una limitación en la tensión de corte turbulenta:

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)} \quad (30)$$

donde S es el módulo del tensor de deformación, y F_2 una función de mezcla.

Ventajas: Preciso en flujos con separación y capas límite. Limitaciones: Mayor costo computacional que otros modelos RANS.

Simulación de Grandes Escalas (LES).

LES resuelve directamente las escalas grandes de la turbulencia y modela las escalas pequeñas mediante un modelo de submallado (SGS, Subgrid-Scale). Es adecuado para flujos transitorios y tridimensionales [72]. Las ecuaciones filtradas de Navier-Stokes son:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \tau_{ij} \right) \quad (31)$$

donde τ_{ij} es el tensor de submallado, modelado comúnmente con el modelo de Smagorinsky:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij}, \quad \mu_t = \rho(C_s \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (32)$$

donde $\bar{S}_{ij}$ es el tensor de deformación filtrado, Δ el tamaño del filtro, y C_s una constante. Ventajas: Captura estructuras turbulentas grandes con alta precisión. Limitaciones: Alto costo computacional, requiere mallas finas y pasos de tiempo pequeños.

Simulación Numérica Directa (DNS).

DNS resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes completas sin modelado, capturando todas las escalas turbulentas hasta la escala de Kolmogorov [72]. Utiliza las ecuaciones de Navier-Stokes sin promediado ni filtrado (ecuaciones 1 y 2). La resolución requiere mallas extremadamente finas, con un número de puntos proporcional a $Re^{9/4}$. Ventajas: Máxima precisión, ideal para estudios fundamentales. Limitaciones: Costo computacional prohibitivo para flujos industriales de alto Reynolds.

Simulación de Remolinos Desprendidos (DES).

DES combina RANS en regiones cercanas a paredes y LES en regiones de flujo libre, ideal para flujos con separación masiva [72]. Utiliza las ecuaciones de $k - \omega$ SST en regiones RANS y cambia a LES en regiones alejadas, ajustando la longitud de disipación según el tamaño de la malla. Ventajas: Equilibra precisión y costo en flujos complejos. Limitaciones: Requiere experiencia para definir regiones RANS/LES y mallas adecuadas.

Los modelos de turbulencia en CFD, desde RANS hasta DNS, ofrecen diferentes niveles de precisión y costo computacional. Los modelos RANS (Spalart-Allmaras, $k - \epsilon$, $k - \omega$, SST) son ideales para aplicaciones industriales debido a su eficiencia, mientras que LES y DES proporcionan mayor detalle en flujos transitorios, y DNS es reservado para investigaciones fundamentales. La elección del modelo depende del problema específico, los recursos computacionales y los objetivos de la simulación.

Rotor Savonius.

Las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT, por sus siglas en inglés) tipo Savonius constituyen una tecnología consolidada para la conversión de energía eólica, particularmente adecuada para aplicaciones de baja potencia, entornos urbanos y condiciones de viento turbulento. Este diseño opera predominantemente por fuerzas de arrastre (drag-type), destacando por su simplicidad constructiva, independencia direccional del viento, alto torque de arranque y bajo costo de fabricación, aunque su coeficiente de potencia (C_p) típico oscila entre 0.15 y 0.25, inferior al límite teórico de Betz (0.593) y a las turbinas de sustentación (lift-type) [31][32].

Antecedentes Históricos y Origen.

Los antecedentes de las turbinas de eje vertical se remontan a la antigüedad. Los primeros molinos de viento documentados fueron los panemone persas, desarrollados en la región de Sistan (actual Irán y Afganistán) entre los siglos VII y IX d.C. Estos dispositivos utilizaban un eje vertical con velas de tela o madera, operando por arrastre y empleados principalmente para molienda de granos y bombeo de agua [33]. Esta tecnología se difundió hacia China durante la era mongola y representó el primer aprovechamiento mecánico sistemático del viento. En Europa, experimentos con palas curvas en turbinas de eje vertical datan de siglos posteriores. El ingeniero e inventor croata-veneciano Fausto Veranzio describió en su obra *Machinae Novae* (1616) varios diseños de turbinas de eje vertical con palas curvas o en forma de V, aunque ninguno alcanzó implementación práctica significativa (Veranzio, 1616). El diseño moderno del rotor Savonius fue inventado por el ingeniero finlandés Sigurd Johannes Savonius en 1922, quien lo patentó en Finlandia en 1926 y en Estados Unidos en 1925-1929 [34]. Inspirado parcialmente en el rotor Flettner (basado en el efecto Magnus), Savonius buscaba un rotor autorrotativo para aplicaciones marítimas y eólicas. Realizó pruebas en embarcaciones en lagos finlandeses, confirmando su viabilidad operativa. El rotor clásico consiste en dos o tres semicilindros desplazados, formando una sección transversal en "S", que genera torque diferencial por la mayor resistencia aerodinámica en la cara cóncava respecto a la convexa [35].

Desarrollo y Evolución.

Desde su invención, el rotor Savonius ha sido objeto de extensas investigaciones para superar su limitada eficiencia aerodinámica. Estudios pioneros en las décadas de 1970, como los de Blackwell [35] y Modi Fernando [36], optimizaron parámetros geométricos como la relación de solapamiento (overlap ratio, óptimo 0.1-0.2), relación de aspecto (aspect ratio, 1.5-2.0) y número de palas (dos o tres óptimas). El interés se intensificó durante la crisis energética de los 1970, promoviendo aplicaciones en países en desarrollo para bombeo de agua y generación mecánica [37]. Investigaciones posteriores incorporaron análisis CFD y experimentales en túneles de viento, confirmando que el C_p máximo ronda 0.21-0.30 en configuraciones optimizadas [37][38].

Variantes Principales.

Numerosas variantes han buscado mitigar limitaciones como el torque pulsatorio y el bajo C_p :

- Rotores multietapa— Dos o tres etapas desplazadas angularmente para suavizar el torque [39].
- Palas modificadas — Formas Benesh, ranuradas (slotted), con perfiles aerodinámicos o deflectores para reducir torque negativo [40].
- Híbridos — Combinación con rotores Darrieus (Savonius para arranque y Darrieus para eficiencia) [41].

Una variante destacada es el rotor helicoidal, desarrollado en los primeros años de la década de 1980 por el ingeniero finlandés Risto Joutsiniemi. Esta modificación aplica una torsión helicoidal (típicamente 90° - 180°) a las palas, eliminando placas terminales, reduciendo vibraciones y logrando un torque más uniforme [38]. Ventajas incluyen arranque en vientos bajos, torque positivo constante, menor ruido y estrés estructural, con C_p hasta 0.30-0.35 [42]. Estudios confirman mejoras significativas en autoarranque y estabilidad [43].

Dinámica de Fluidos Computacional.

La dinámica de fluidos computacional es actualmente una herramienta poderosa y confiable para el análisis fluidodinámico de objetos cuando interactúan con un fluido y lo hace por medio de resolver ciertas ecuaciones gobernantes usando tanto algoritmos computacionales como métodos numéricos en un dominio discretizado, es decir que se encuentra subdividido en una cantidad finita elementos y cuya dimensión es muy pequeña comparada con el volumen del cuerpo a analizar. El presente estudio hace uso en gran manera de la dinámica de fluidos computacional, es por eso que es indispensable conocer el fundamento teórico que hay detrás de su funcionamiento y su estrecha relación en el análisis de turbinas eólicas, en específico el modelo que aquí se estudia.

Su importancia radica en que permite reemplazar o reducir drásticamente las pruebas físicas costosas, lentas y a veces imposibles a escala real, por simulaciones virtuales de alta fidelidad que entregan información detallada en cualquier punto del dominio, en cualquier instante y bajo condiciones muy variadas. CFD permite como se mencionaba analizar cuerpos sólidos cuando interactúan con un fluido y lo hace por medio de resolver un conjunto de ecuaciones gobernantes que matemáticamente describen el comportamiento del fluido [2], específicamente las ecuaciones de Navier-Stokes:

Ecuaciones Fundamentales de la Dinámica de Fluidos.

Ecuación de Continuidad (conservación de la masa).

La cantidad de fluido que entra en un volumen de control es igual a la que sale de él.

La forma diferencial de la ecuación de continuidad es:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

donde ρ es la densidad y $\mathbf{v}$ es el vector velocidad del fluido.

Ecuación de Conservación del Momento (segunda ley de Newton para fluidos).

Describe cómo las fuerzas de presión, viscosidad y fuerzas externas (gravedad, etc.) afectan el movimiento del fluido.

Forma más común (para fluido newtoniano e incompresible en muchas aplicaciones):

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f} \quad (2)$$

donde:

- ρ es la densidad,
- $\mathbf{v}$ es el vector velocidad,
- p es la presión,
- μ es la viscosidad dinámica,
- $\mathbf{f}$ representa las fuerzas externas por unidad de volumen (por ejemplo $\rho \mathbf{g}$ para gravedad).

Ecuación de Conservación de la Energía.

Se utiliza cuando se analizan efectos térmicos, flujos compresibles o con transferencia de calor.

Una forma habitual de la ecuación de energía (para energía interna):

$$\rho \left(\frac{\partial e}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla e \right) = -p (\nabla \cdot \mathbf{v}) + \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi \quad (3)$$

donde:

- e es la energía interna por unidad de masa,
- k es la conductividad térmica,
- T es la temperatura,
- Φ es el término de disipación viscosa (conversión de energía mecánica en calor por efectos viscosos)

La tabla (4) resume de manera práctica los términos que conforman las ecuaciones gobernantes CFD.

Ecuación	Forma	Significado
Continuidad	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$	$\frac{\partial \rho}{\partial t}$: cambio local de densidad $\nabla \cdot (\rho \mathbf{v})$: flujo neto de masa
Momento	$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right)$ $= -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f}$	$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}$: aceleración local $\rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}$: aceleración convectiva $-\nabla p$: fuerza por gradiente de presión $\mu \nabla^2 \mathbf{v}$: fuerza viscosa $\mathbf{f}$: fuerzas externas
Energía	$\rho \frac{De}{Dt} = -p(\nabla \cdot \mathbf{v}) + \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi$	$\rho \frac{De}{Dt}$: cambio de energía interna $-p(\nabla \cdot \mathbf{v})$: trabajo de compresión $\nabla \cdot (k \nabla T)$: conducción térmica Φ : disipación viscosa

Resolver de manera analítica las ecuaciones gobernantes que describen el comportamiento del fluido resulta hasta hoy en día un intento fallido, es por ellos que las técnicas CFD simplifican los cálculos iterativos resolviendo por medio de métodos numéricos las ecuaciones de Navier Stokes en cada uno de los elementos que integran el dominio discretizado. A continuación se expone la metodología usada comúnmente en el análisis CFD y que es aplicable para diferentes áreas de estudio, donde intervengan flujos de fluidos (líquidos, gases, multifásicos), transferencia de calor, turbulencia, combustión o interacciones fluido-estructura. A continuación en la tabla 5 se desarrolla paso a paso la metodología que describe realizar un análisis CFD.

Tabla 4: Metodología CFD: Flujo de trabajo.

Etapas	Objetivo principal
Definición del problema y objetivos	Establecer con precisión qué se desea predecir; coeficientes aerodinámicos, transferencia de calor, distribución de presión, el régimen físico del flujo laminar/turbulento, incompresible/compresible, estacionario/transitorio y definir el nivel de precisión que se requiere en función de los objetivos del proyecto y los recursos computacionales disponibles.
Definición de geometría y dominio computacional	Crear una representación CAD limpia y fiel del sistema físico, eliminando defectos geométricos además de construir un dominio computacional suficientemente amplio para evitar interferencias en las zonas de interés.
Generación y control de malla	Construir una malla de buena calidad que capture con precisión los fenómenos físicos de mayor importancia (capas límite, zonas de separación, estela), minimizando el error de discretización y permita demostrar numéricamente la independencia de malla.
Selección de modelos físicos	Selección y configuración de las ecuaciones gobernantes y los modelos físicos que incluyen la turbulencia, transferencia de calor, multifase, compresibilidad, transiciones a fin de reproducir de forma fiel y eficiente los parámetros dominantes del problema real a simular.
Condiciones de contorno e iniciales	Definir las condiciones realistas en los límites del dominio, lo cual incluye la velocidad, presión, temperatura, turbulencia de entrada, pared, salida a fin de establecer un campo inicial correcto que facilite la convergencia y represente de buena manera el estado inicial del sistema.
Configuración numérica y solución	Seleccionar y ajustar los métodos numéricos, esquemas de discretización, algoritmos de solución, controles de convergencia, para garantizar una solución estable, que converja en un tiempo de cálculo razonable.
Post-procesamiento y validación	Extraer, visualizar y cuantificar los resultados de interés, campos, contornos, vórtices, líneas de corriente y demostrar su credibilidad mediante una comparación con datos experimentales de alta calidad, soluciones analíticas o simulaciones de referencia validadas.

Analisis de Independencia de Malla

El análisis de independencia de malla, también conocido como estudio de convergencia de malla o mesh independence study, es un proceso fundamental en campos como el método de elementos finitos (MEF) y la dinámica de fluidos computacional (CFD). Es como una verificación práctica para asegurarte de que los resultados numéricos sean confiables y no dependan excesivamente de cómo has dividido el modelo —es decir, la malla—. Si refinas la malla haciendo las celdas más pequeñas y numerosas y los resultados cambian mucho, eso indica que tu simulación inicial no era lo suficientemente precisa. Por el contrario, si los cambios son mínimos más allá de cierto punto, has alcanzado la independencia, lo que te permite equilibrar exactitud con eficiencia computacional, evitando cálculos innecesariamente largos y costosos. En términos prácticos, este análisis ayuda a mitigar errores de discretización, que surgen al aproximar un problema continuo (como el flujo de un fluido o la deformación de una estructura) en un modelo discreto. Los pasos típicos para realizarlo son accesibles, aunque requieren algo de iteración:

- Genera al menos tres mallas con niveles de refinamiento progresivos (por ejemplo, gruesa, media y fina, duplicando el número de elementos cada vez).
- Ejecuta la simulación para cada una y monitorea variables clave, como la velocidad máxima en CFD o el estrés von Mises en MEF.
- Calcula la diferencia relativa entre resultados (por ejemplo, error porcentual) y gráfica contra el tamaño de celda o número de elementos.

Metodología.

El proceso de investigación inicio con la búsqueda y análisis de literatura relacionada con el presente estudio a fin de entender mejor el impacto real del empleo de inductores (deflectores, guidores de flujo, concentradores o dispositivos de aumento de caudal) produce sobre el desempeño aerodinámico global de las turbinas eólicas de eje vertical de tipo Savonius, particularmente en lo referente a:

Coeficiente de potencia máxima (C_p máx), coeficiente de par estático y dinámico, rango operativo de velocidad de viento (velocidad de arranque y corte) y comportamiento del coeficiente de empuje y momento de torsión en función del ángulo de azimutal.

Esta revisión abarcó tanto literatura clásica que sentó las bases del comportamiento aerodinámico del rotor Savonius (trabajos de Savonius, Khan, Fujisawa, Ushiyama, entre otros), como los desarrollos más recientes [35][37][38][45][46] enfocados en:

- Implementación de inductores de diferentes geometrías (curvos, rectos, múltiples, asimétricos, con álabes, entre otros).
- Estudios comparativos entre configuraciones con y sin inductores.
- Análisis mediante CFD (LES, DES, RANS con modelos de turbulencia avanzados)

- Modelos analíticos y semi-empíricos.

De esta manera, la revisión bibliográfica proporcionó el marco conceptual y teórico necesario que también sirvió como fundamento sólido para la toma de decisiones metodológicas posteriores y así garantizar que la investigación contribuya de manera significativa al conocimiento existente en el campo de las turbinas eólicas de eje vertical tipo Savonius asistidas por inductores.

Variables de Diseño.

Se identifican parámetros clave de diseño y rendimiento a considerar antes de hacer una propuesta de diseño del inductor y del rotor Savonius, algunos de ellos se enlistan a continuación:

- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| ■ Potencia Requerida (P) | ■ Densidad (ρ) |
| ■ Coeficiente de Potencia (C_p) | ■ Viscosidad Dinámica (μ) |
| ■ Eficiencia (λ) | ■ Factor de Inducción (a) |
| ■ Velocidad Especifica (TSR) | ■ Diametro (D) |
| ■ Numero de Alabes | ■ Velocidad de Rotación (ω) |
| ■ Velocidad de Viento (U) | ■ Número de Reynolds (Re) |
| ■ Presión del Viento (p) | |

Las variables indispensables para iniciar el proceso de diseño de una turbina eólica Savonius son la potencia requerida y la velocidad del recurso eólico disponible, es decir, la cantidad de energía necesaria para satisfacer una demanda específica. En aplicaciones de baja potencia, típicas de prototipos experimentales y pruebas en túneles de viento, los rangos reportados oscilan entre unos pocos watts (por ejemplo, 0.46-6.64 W a velocidades de 6-9 m/s, o hasta 50-187 W en configuraciones optimizadas), con diámetros de rotor entre 0.23 y 0.5 m, alturas de 0.3-1 m y áreas de barrido compatibles con secciones de prueba de 0.6-1 m [32][39][40][44]. Hemos tomado como referencia modelos previamente desarrollados para seleccionar una potencia realista y funcional [46], considerando que las dimensiones del prototipo están condicionadas por la sección de prueba del túnel de viento disponible (aproximadamente 60 × 60 cm) que es donde se realizaran las pruebas de validación por lo cual se limita el diámetro y altura del rotor para minimizar efectos de bloqueo y garantizar condiciones de flujo representativas.

Velocidad del flujo de aire

Se ha seleccionado una velocidad de viento de 9 m/s, valor considerado alcanzable en la sección de pruebas destinada al análisis del rotor Savonius. Esta elección se sustenta en antecedentes experimentales y numéricos de alta relevancia, entre ellos el estudio de Lajnef, M.[46], quien llevó a cabo el análisis de un rotor Savonius acoplado a un inductor, empleando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y validación experimental bajo una velocidad de viento de 9 m/s. En dicho trabajo se obtuvieron resultados consistentes entre las fases computacional y experimental, lo que respalda la idea de optar por esta velocidad de referencia para el presente estudio.

Presión de viento

Considerando la altitud sobre el nivel del mar, para $z = 1920$ m (correspondiente a la altura a la que se encuentra instalado el dispositivo de pruebas), se calcula la presión atmosférica aproximada mediante la siguiente expresión polinómica de segundo orden, ampliamente utilizada en normas mexicanas de diseño estructural:

$$p = 101,29 - 0,011837 z + 4,793 \times 10^{-7} z^2 \quad (33)$$

donde p se expresa en kPa y z en metros sobre el nivel del mar.

Sustituyendo el valor de altitud correspondiente al sitio de estudio:

$$(z = 1920 \text{ m}):$$

$$\begin{aligned} p &= 101,29 - 0,011837 \times 1920 + 4,793 \times 10^{-7} \times (1920)^2 \\ &= 80,3313312 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$p \approx 80,33 \text{ kPa}$$

Este valor se utiliza como parámetro de referencia para la caracterización de las condiciones de viento en el sitio de estudio. La expresión polinómica es una aproximación práctica adoptada en varios manuales y normas mexicanas de diseño estructural, entre ellos el *Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad* (CFE) y documentos complementarios al Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, así como en diversas adaptaciones locales basadas en la norma ASCE 7 [62].

Densidad del aire

La densidad del aire afecta de manera directa en la generación de energía eólica, ya que forma parte de la expresión de la potencia disponible en el viento. Se calcula a partir de la relación:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T}, \quad (34)$$

donde P es la presión del aire, $R = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ es la constante de los gases para el aire seco y T es la temperatura absoluta del aire local en Kelvin.

Para la ciudad de Morelia, considerando una temperatura promedio de $T = 299,65 \text{ K}$, se obtiene una densidad del aire aproximada de:

$$\rho \approx 0,93 \text{ kg}/\text{m}^3. \quad (35)$$

Viscosidad dinámica

La viscosidad dinámica del aire se toma en función de la temperatura ambiente. Para una temperatura de 25°C , de acuerdo con los datos reportados por Yunus A. Cengel [63], se adopta un valor de:

$$\mu = 1,85 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}). \quad (36)$$

Diámetro y radio del rotor

Con base en las dimensiones disponibles en la sección de pruebas, se definió un diámetro adecuado para el rotor, considerando tanto el espacio requerido por el propio rotor Savonius como el volumen adicional necesario para los elementos asociados al inductor acoplado. De esta manera, para el rotor Savonius analizado se estableció un diámetro de 17 cm, lo que corresponde a un radio de 8,5 cm. Estos valores garantizan la correcta incorporación del sistema dentro de la estructura experimental y permiten realizar las pruebas bajo condiciones controladas.

Velocidad Especifica

La importancia del diseño de turbinas eólicas depende en gran medida de la correcta selección de la velocidad específica, lo cual permitirá que se extraiga la mayor cantidad de energía eólica posible. Seleccionar una velocidad específica resulta un tema que es complejo de realizar al inicio de un diseño, pues depende de la parte experimental y datos computacionales obtenidos; sin embargo, resulta útil hacerse valer de literatura del área eólica y en específico de turbinas de eje vertical para encontrar un rango de velocidades específicas aceptables, para turbinas eólicas de eje vertical tipo Savonius que funcionan principalmente por fuerza de arrastre (drag), lo que limita su tip speed ratio (TSR), la relación entre la velocidad tangencial en la punta de la pala y la velocidad del viento se encuentra típicamente a un rango de 0.7 a 1.0, donde alcanzan su máximo coeficiente de potencia [32].

En la mayoría de los diseños convencionales, el TSR óptimo se sitúa alrededor de 0.8–0.9, aunque en algunos casos mejorados puede llegar ligeramente por encima de 1 gracias a contribuciones, elementos extras como inductores o concentradores de flujo [31]. Debido a este bajo TSR, las velocidades angulares y de rotación (en rpm) son modestas. Por ejemplo, en condiciones típicas de viento de 6–10 m/s y rotores de tamaño pequeño a mediano (diámetro 1–3 m), las velocidades de rotación suelen encontrarse entre 50 y 150 rpm, dependiendo del diseño específico y la carga aplicada [64].

En esta etapa, donde se pretende definir de manera correcta el dimensionamiento y características del rotor Savonius se ha elegido un valor de 1 para TSR lo cual está dentro del rango y es reportado por diferentes autores, entre ellos Lajnef, M. [46] como óptimo para el diseño de rotores Savonius a esta escala.

Potencia Disponible.

Considerando los valores de las variables anteriores se presenta un análisis teórico de la potencia eólica disponible bajo circunstancias específicas, sin considerar pérdidas por torque resistivo del generador, por fricción y tomando el valor máximo posible del factor de inducción para un rotor que opera en el límite de Betz, este valor de potencia aunque no es real debido a las consideraciones antes mencionadas nos permite identificar la mayor cantidad de energía que es posible extraer de un rotor en condiciones óptimas, siendo un buen punto de referencia a fin de dimensionar correctamente el rotor a diseñar y tener la certeza de los valores de potencia que se puede obtener en las mejores circunstancias. Considerando un factor de inducción de 0.33, una velocidad de viento de 9 m/s, un área de barrido de 0.034 m² :

$$P = \frac{1}{2} \rho A U^3 4a(1-a)^2 \quad (37)$$

$$P = \frac{1}{2} 0,9339(0,034)9^3 4(0,33)(1 - 0,33)^2 \quad (38)$$

$$P = 6.85 \text{ Watts}$$

Los valores correspondientes de los parametros que describen las características del rotor Savonius se enlistan a continuación en la tabla (6):

Tabla 5: Parámetros del rotor Savonius

Parámetro	Valor
Coefficiente de Potencia Teórico (C_p)	0.47
Eficiencia Teórica del Generador	0.97
Velocidad Específica (λ)	1
Número de Álabes	3
Velocidad de Viento (V)	9 m/s
Presión del Viento (p)	80.33 Pa
Densidad	0.934
Viscosidad Dinámica (μ)	$1.85 \cdot 10^{-5}$
Diámetro (D)	0.170 m
Radio (R)	0.085 m
Potencia Disponible (P)	6.64 W

Diseño del rotor Savonius.

Una vez identificadas las principales variables que componen el diseño se hace uso de diseño asistido por computadora para recrear el rotor Savonius que será el elemento principal de la turbina y entorno al cual se diseñará el inductor, para ello se han tomado como consideración la cantidad de recurso eólico disponible, las dimensiones de la zona de prueba (la cual tiene una dimensión de 60 cm cuadrados a la salida), así como de las herramientas de manufactura disponibles a fin de obtener el modelo físico que será sometido a pruebas experimentales permitiendo la validación del modelo CFD.

El primer boceto de la representación del rotor Savonius se muestra en la figura (9) con la definición del diámetro de los discos superior e inferior que sujetaran los álabes curvos del mismo y le darán el soporte necesario para resistir los esfuerzos y cargas generadas.

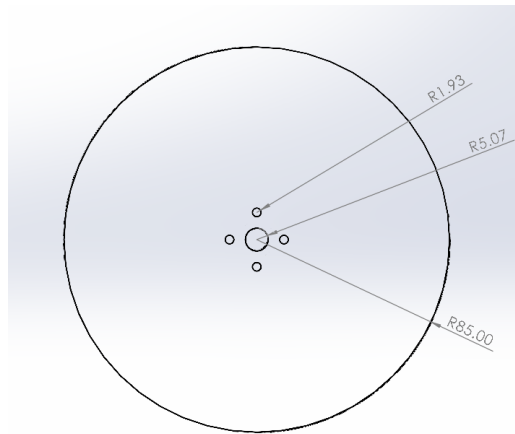


Figura 9: Geometría Base de Rotor Savonius

El diámetro seleccionado del rotor es de 170 mm con una circunferencia en el centro que funcionara como barreno para el eje, el cual tiene un diámetro de 10 mm como se observa en la geometría y cuatro barrenos al rededor de aproximadamente 1.93 mm de radio que cumplen la función de sujetar el rotor al eje por medio de bridas, permitiendo esto que queden unidos en una sola pieza.

Creada la base del rotor se genera la forma de las palas, en el caso de los rotores Savonius es una forma helicoidal, siendo una pala cóncava y la otra convexa, las palas tienen una dimensión de 40 y 38 mm de radio externo e interno respectivamente, eso da un espesor de 2 mm a cada pala lo cual resultara práctico para la manufactura de la misma (figura 10).

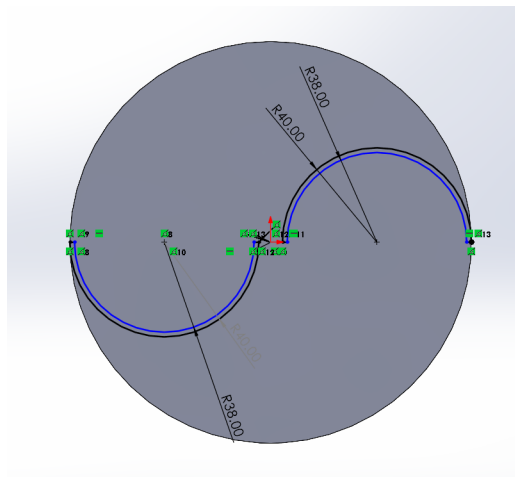


Figura 10: Geometria de Palas Rotor Savonius

Definida la base superior e inferior del rotor -la cual cumple la función de soportar la cara helicoidal del rotor, además de darle rigidez a las zonas más curvas permitiendo que las mismas no se flexionen

con los esfuerzos o fuerzas generadas en la rotación- y sus palas se crea una extrucción siguiendo una trayectoria que parte desde la base inferior hasta la superior a fin de describir de forma correcta el helicoide característico de este tipo de turbinas. La trayectoria es de un cuarto de revolución con una altura de 200 mm y diámetro de 170 mm. En la figura (11) se muestra la cuerda de esta operación en tres dimensiones al rededor del rotor Savonius:

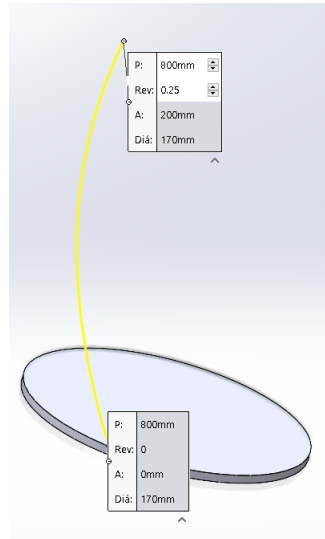


Figura 11: Trayectoria de Extrucción Rotor Savonius

Construida la curva que definen las palas, se muestra el rotor Savonius de manera completa y con sus dimensiones reales, es importante mencionar que la escala utilizada para el diseño es 1:1 (figura 12). Como se mencionó antes, la patente del rotor Savonius, en su forma original, se atribuye al ingeniero finlandés Sigurd Johannes Savonius, quien lo inventó en 1924 y lo patentó en 1926. La variante helicoidal del rotor Savonius fue desarrollada posteriormente por otros ingenieros y diseñadores. Uno de los primeros en trabajar en esta configuración fue Ulrich Stampa, quien patentó un diseño de turbina helicoidal en 1979 [29].

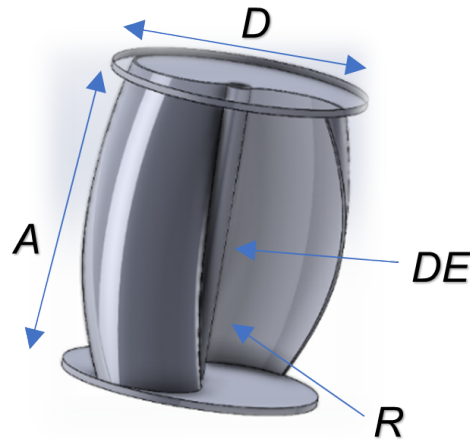


Figura 12: Geometria 3D de Rotor Savonius

Las dimensiones que forman el rotor Savonius se enlistan en la tabla (7):

Nomenclatura	Descripción del Rotor	Dimensión
A	Altura del Rotor	220 mm
D	Diámetro de Rotor	170 mm
N	Número de Palas	2 Palas
R	Radio de Pala	40 mm
AR	Ángulo de Torsión	90°
DE	Diámetro de Eje	10 mm
E	Espesor de Pala	2 mm

Tabla 6: Dimensiones del Rotor Savonius

Definir un geometria que sea una representación fidedigna del objeto a analizar es el primer paso en la herramienta CFD, esto permitira hacer un analisis realista y tambien una manufactura correcta y en ambos casos los resultados podrían verse afectados sino se hace un buen diseño.

Propuesta de Diseño del Inductor.

La incorporación de un dispositivo capaz de mejorar el desempeño del rotor Savonius hizo evidente la necesidad de identificar en primera instancia las variables que tienen una mayor influencia, la literatura nos ha permitido entender que la protección de la pala convexa es vital para aumentar la eficiencia del rotor Savonius y al mismo tiempo lo es dirigir el flujo de aire en dirección de la pala de mayor aporte, es decir la pala concava. Antes de presentar una propuesta de diseño resulta importante mencionar que existen ciertas variables de diseño para el caso del inductor que son necesarias controlar a fin de obtener la configuración óptima que permita aprovechar el flujo de aire sobre el rotor Savonius de la mejor manera y son las siguientes (figura 13):

- Angulo del inductor pala convexa (ϑ).
- Angulo del inductor pala cóncava (ϕ).
- Longitud del inductor pala cóncava (LA).
- Longitud del inductor pala convexa (LE).
- Radio de flexión en la salida del inductor (RS).

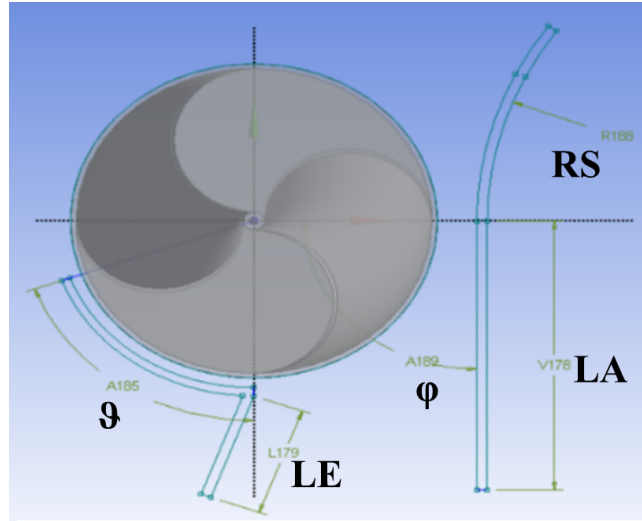


Figura 13: Variables Principales

Las primeras propuestas de diseño fueron enfocadas en analizar la importancia de la longitud del inductor de ambos lados de las palas y tomando como referencias la influencia que la misma tiene en su comportamiento, por ello se realizó su variación desde una dimensión pequeña y aumentando hasta una longitud que superaba en 1.5 veces el diámetro del rotor, lo mismo aplico para el lado de la pala cóncava. En primera instancia los diseños propuestos fueron influidos por las variables de principal influencia; sin embargo, como se verá más adelante una vez establecidas todas las condiciones de análisis CFD se llevó a cabo la variación de las mismas de manera simultanea a fin de obtener la configuración con mejor desempeño respecto a un monitor que nos permite obtener el comportamiento aerodinámico del rotor Savonius. La representación de las primeras propuestas de diseño del inductor se muestran en la figura (14):

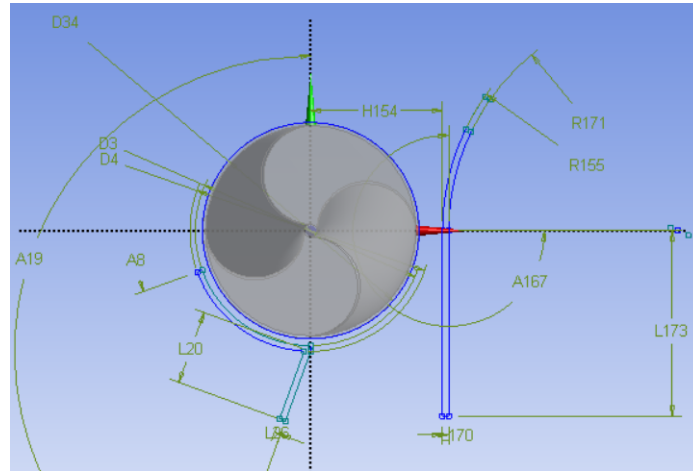


Figura 14: Propuesta de Inductor

Como se ha indicado anteriormente, la función principal del inductor es disminuir la pérdida de eficiencia del rotor al modificar de manera controlada el flujo de aire que incide sobre las palas. En concreto, el inductor reduce el flujo de aire que impacta en la parte convexa de la pala, la cual tiende a oponerse al movimiento de giro y, por tanto, a desacelerarla. Al mismo tiempo, el inductor ayuda a concentrar y canalizar el flujo de aire hacia la parte cóncava, que es la responsable de generar la mayor parte del par útil.

Las dimensiones y la geometría asignadas al inductor en esta etapa de diseño se han definido con el objetivo de aproximarse al punto de máxima eficiencia del rotor. Sin embargo, estas dimensiones no deben considerarse definitivas. Será necesario un proceso de ajuste y optimización, que puede incluir simulaciones numéricas, ensayos experimentales y análisis comparativos, hasta determinar el punto óptimo de funcionamiento en términos de rendimiento aerodinámico y estabilidad estructural.

En la literatura y en diversos estudios experimentales se han desarrollado múltiples configuraciones de inductores y dispositivos de guiado de flujo orientados a mejorar el desempeño del rotor Savonius. Entre ellos se incluyen cortinas, deflectores, perfiles guía y diferentes arreglos de conductos que modifican la distribución de velocidades alrededor del rotor. Algunos de estos dispositivos, así como su principio de funcionamiento y sus ventajas y limitaciones, se han mencionado en la sección correspondiente a inductores, donde se presenta una visión general de las soluciones más representativas para incrementar la eficiencia de este tipo de rotores [25][26][27][28].

El diseño propuesto del inductor cubre en su totalidad el rotor en forma de una cortina que protege el área de las palas en las direcciones alrededor del mismo. Esto condiciona al inductor a recibir siempre de frente el flujo de aire, lo cual es una consideración importante a tener en cuenta en el diseño. Realizar la consideración de todas las variables en las propuestas de diseño se convertiría en una labor extensa que podría no ser funcional e implicaría un extenso análisis de combinaciones de parámetros, es por ello que se ha hecho uso del método de optimización de pruebas ortogonales que permite relacionar todas las variables implicadas en el desempeño aerodinámico.

En la tabla (8) se presentan las variables de mayor influencia en el diseño del inductor para el rotor Savonius y que serán esenciales considerar para encontrar la posición y forma adecuada en la propuesta de diseño. El método de optimización seleccionado se le denomina de pruebas ortogonales el cual deriva del método Taguchi, en el contexto de CFD, el método de de pruebas ortogonales se aplica principalmente en la fase conceptual y preliminar de diseño de componentes aerodinámicos, hidrodinámicos y térmicos [74]. Es decir es una técnica de diseño de experimentos (DOE) que utiliza arreglos ortogonales cuyo objetivo principal es reducir el número de pruebas necesarias para evaluar múltiples factores y niveles. Se usa en específico en: pruebas de software e ingeniería experimental.

El método de optimización comienza identificando las variables o factores de control los cuales corresponden a los parámetros que se desean modificar, así mismo se identifican los niveles correspondientes a cada factor, para nuestro caso de estudio se ha seleccionado como factores y niveles los siguientes datos:

Tabla 7: Factores y Niveles para Optimización de Inductor de Turbina Savonius

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Ángulo de extensión del inductor en pala convexa (ϑ)	30°	45°	70°	90°
Ángulo de apertura a la entrada del inductor (ϕ)	90°	120°	150°	170°
Longitud del inductor parte cóncava (LA)	70 mm	120 mm	170 mm	220 mm
Longitud del inductor parte convexa (LE)	70 mm	85 mm	100 mm	115 mm
Radio de flexión en la salida del inductor (RS)	190 mm	200 mm	210 mm	220 mm

La variación de los niveles se ha considerado en ese orden de magnitud, pues permite un barrido completo del área que conforma el rotor Savonius, enfocándose en diferentes posiciones.

Para 5 factores a 4 niveles, el arreglo ortogonal estándar más eficiente y utilizado es: $L_{16} (4^5)$

Es decir: para un arreglo ortogonal con k niveles y m factores, el número mínimo de filas (experimentos) necesario para mantener la ortogonalidad es: mínimo de filas = k^2 En el caso de 4 niveles: $4^2 = 16$ filas

→ 16 experimentos (simulaciones CFD)

→ Capacidad: hasta 5 factores a 4 niveles.

Lo anterior tomando en cuenta el catálogo general de Taguchi el cual se presenta en la tabla (9):

El caso particular aplicable a este caso de $L_{16} (4^5)$ – 5 factores a 4 niveles, se muestra en la tabla (10):

Tabla 8: Catálogo básico de arreglos ortogonales Taguchi

Arreglo	Experimentos	Niveles	Máx. factores	Notación típica
L4	4	2	3	$L_4(2^3)$
L8	8	2	7	$L_8(2^7)$
L9	9	3	4	$L_9(3^4)$
L12	12	2	11	$L_{12}(2^{11})$
L16	16	2	15	$L_{16}(2^{15})$
L16	16	4	5	$L_{16}(4^5)$
L18	18	mixto	8	$L_{18}(2^1 \cdot 3^7)$
L27	27	3	13	$L_{27}(3^{13})$
L25	25	5	6	$L_{25}(5^6)$

Tabla 9: Arreglo ortogonal $L_{16}(4^5)$ – 5 factores a 4 niveles

Exp.	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

El caso particular aplicable a este caso de $L_{16} (4^5)$ – 5 factores a 4 niveles con los valores sustituidos se muestra en la tabla (11):

Tabla 10: Arreglo Ortogonal para Optimización de Inductor

Caso	ϑ	φ	LA	LE	RS
1	30	90	70	70	190
2	30	120	120	85	200
3	30	150	170	100	210
4	30	170	220	115	220
5	45	90	120	100	220
6	45	120	70	115	210
7	45	150	220	70	200
8	45	170	170	85	190
9	70	90	170	115	200
10	70	120	220	100	190
11	70	150	70	85	220
12	70	170	120	70	210
13	90	90	220	85	210
14	90	120	170	70	220
15	90	150	120	115	190
16	90	170	70	100	200

Por lo tanto tenemos un arreglo final de 16 experimentos que involucran 5 factores con 4 niveles cada uno. La importancia de estas pruebas ortogonales se corroboran al identificar que sin la aplicación del método el número de simulaciones necesarias subiría hasta un valor de: $4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 4 = 1024$ combinaciones, lo cual resultaría en un tiempo de cómputo altísimo y completamente impráctico.

Los 16 experimentos anteriores se sometieron al análisis mediante simulaciones CFD (la discretización, configuración de solución y posprocesamiento seguido a fin de encontrar la solución se indicará en las siguientes secciones), usando como monitor el parámetro de coeficiente de momento C_p , a fin de identificar la configuración óptima de las dimensiones del inductor, los resultados obtenidos para dichas simulaciones se resumen en la tabla (12):

Tabla 11: Coeficiente de Momento por Experimento

Experimento	Coeficiente de Momento
1	0.09450
2	0.13260
3	0.12996
4	0.13611
5	0.15180
6	0.15222
7	0.15386
8	0.09820
9	0.29111
10	0.23737
11	0.26686
12	0.16889
13	0.22885
14	0.23889
15	0.18998
16	0.24221

Se puede observar que el valor máximo de coeficiente de momento se obtiene para el experimento 9 con un valor de 0.29111 por lo cual la configuración óptima de diseño del inductor Savonius corresponde a las dimensiones establecidas en este experimento y son las siguientes:

- Ángulo de inclinación: $\vartheta = 70^\circ$
- Ángulo de orientación: $\phi = 90^\circ$
- Longitud LA: $LA = 170 \text{ mm}$
- Longitud LE: $LE = 115 \text{ mm}$
- Radio RS: $RS = 200 \text{ mm}$

La geometría correspondiente se presenta en la figura (15) en una vista superior en 2D:

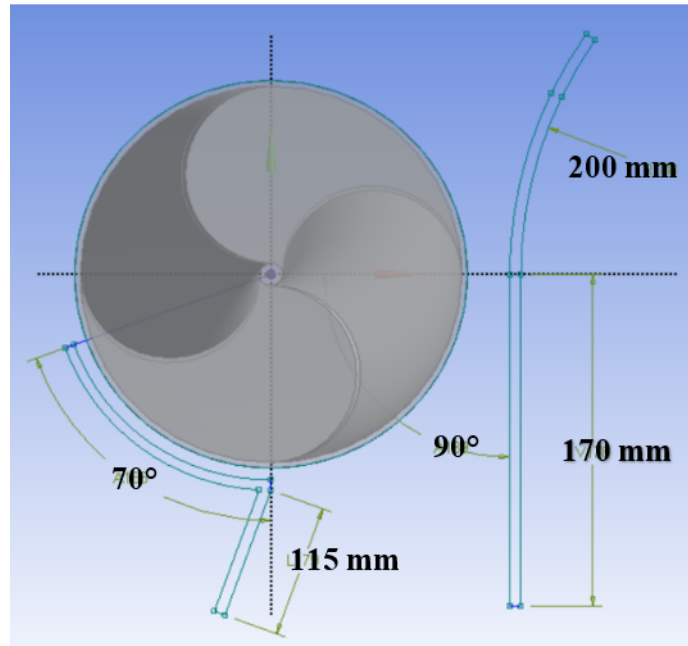


Figura 15: Geometría de Diseño del Inductor

La propuesta final del inductor nos permite visualizar un inductor de dimensiones mayores a las del rotor Savonius, este estudio además de proporcionar un nuevo diseño de inductor que mejore las prestaciones aerodinámicas del rotor Savonius también busca introducir un diseño que sea funcional y que tenga la capacidad de ser integrado como un elemento que forme parte de la turbina. El recurso eólico, como es sabido, cambia de intensidad y dirección en lapsos cortos de tiempo, es por ello que se han considerado estas observaciones para crear el diseño final del inductor, esto se ha logrado añadiendo ejes en la parte superior e inferior a las paredes que conforman el mismo, uniéndolos en una sola pieza por medio de soportes que a su vez se unirán al eje central, el cual tendrá el objetivo de montarse en un sistema de rodamientos dándole la capacidad de girar libremente a fin de alinearse en la dirección del flujo de viento más conveniente, esto último se pretende lograr haciendo uso de un dispositivo usado comúnmente para indicar la dirección del viento, su nombre más común es veleta (respecto al diseño de la misma se introducirá una sección más adelante). El diseño del inductor con estas modificaciones integradas se muestra en una vista 3D en la figura (16):

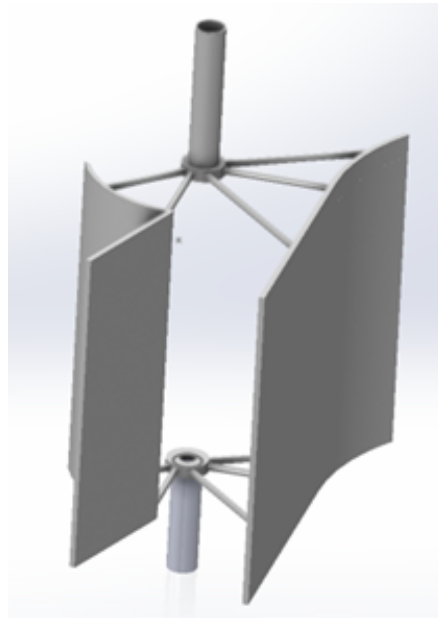


Figura 16: Inductor Vista 3D

Análisis Mediante Simulaciones CFD.

Para validar que la propuesta de diseño cumple con el objetivo de mejorar la eficiencia de la turbina mediante el uso del inductor, se utilizan simulaciones computacionales evaluando el efecto de cada configuración en el rendimiento del rotor HSW. Este análisis se llevará a cabo haciendo uso de software CFD. Esta etapa requiere tener una configuración precisa dentro del entorno del software de análisis, por ello para poder lograr este objetivo se hará uso de un modelos previamente definidos, en específico en los estudios realizados por Mariem Lajnef [46], Keyhan Layeghmand [26], Majid Eshagh Nimvaria [27], Altan Altigan [40], Mohamed [2], Wenlong Tian [28], Saha [37], entre otros. A continuación se hará una descripción de cada paso seguido en la configuración del entorno:

Geometria, Dominio y Secciones.

El procedimiento de análisis CFD comienza con la definición de la geometria que sea una representación fidedigna del cuerpo a analizar, la geometria que representa la forma correcta del rotor Savonius se presenta en la figura (12), respecto al inductor la representación geometria se identifica en la figura (16), en conjunto forman la siguiente configuración de la figura (17):

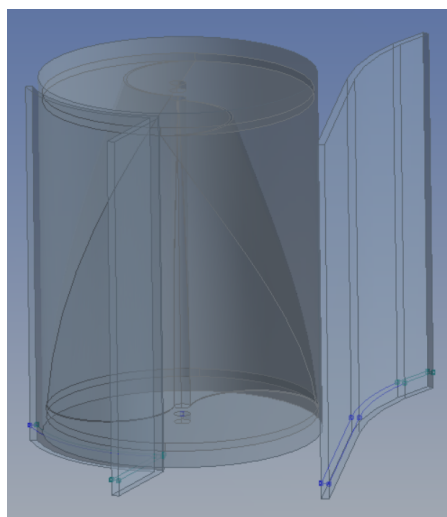


Figura 17: Geometria de Rotor Savonius con Inductor

Una vez que se carga la geometria de los elementos a analizar se procede a crear la representación del dominio computacional que es la zona donde se resolveran las ecuaciones gobernantes que describen el comportamiento del fluido y su interacciones con los cuerpos.

El dominio tiene una dimensión de 2400 mm de ancho (NA) y 2400 mm de altura (A), es decir es un dominio cuadrado, con una longitud de extrucción de 5000 mm (P), la posición del rotor Savonius respecto al dominio es de 1000 mm respecto a la entrada y 4000 mm respecto a la salida, la representación del dominio general se muestra en la figura (18):

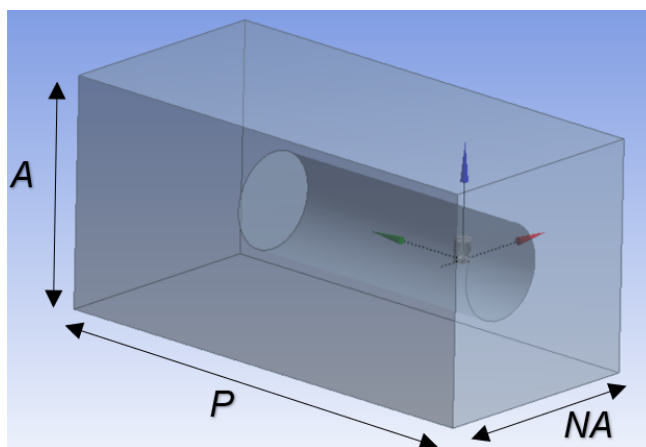


Figura 18: Dominio Computacional

El dominio tiene unas dimensiones bastante mayores a comparación de los elementos a analizar (rotor e inductor) con la finalidad de evitar efectos negativos por interacción de fluido que circula con las paredes y así evitar lo que se denomina efecto bloque, es decir una aceleración forzada del fluido al entrar en un area estrecha y que condiciona los resultados obtenidos [76].

Se han generado dos subdominios de menor dimensión en las regiones más cercas al rotor e inductor, el primero un cilindro en la parte central de la turbina y a lo largo del dominio principal con la intensión de tener un mayor control del mallado en la zona de estela que se generara con la rotación, de esta manera se tienen mejores resultados del comportamiento aerodinámico, sus dimensiones son en longitud (LR) 18 veces el diametro del rotor y un radio (R) de 6 veces el diametro del rotor. Dicho dominio en forma de cilindro y sus dimensiones se presentan en la figura (19):

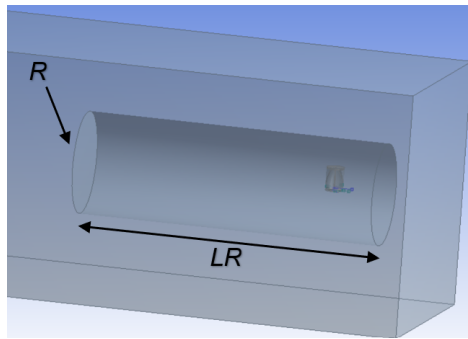


Figura 19: Dominio de Refinamiento

Finalmente, se incorpora el dominio rotatorio que cumple la función de limitar el volumen que estará girando, envolviendo el entorno al rotor Savonius. Es un volumen cilíndrico que está muy próximo a las palas que conforman la turbina. Su geometría se presenta en la figura (20):

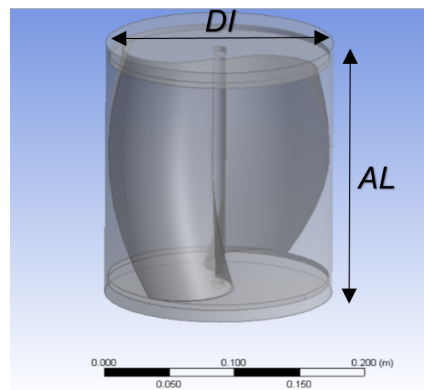


Figura 20: Dominio Rotatorio

A continuación se muestran las dimensiones de cada una de las partes que conforman el dominio computacional en la tabla (13):

Tabla 12: Dimensiones del dominio computacional (respecto al diámetro D del rotor Savonius)

Nomenclatura	Descripción	Dimensión
<i>Dominio General</i>		
L	Largo	14D
NA	Ancho	14D
P	Profundidad	29D
<i>Dominio Rotatorio</i>		
DI	Diámetro	1.02D
AL	Altura	1.35D
<i>Zona de Refinamiento</i>		
R	Radio de Cilindro	6D
LR	Longitud de Cilindro	18D

Establecida la geometría y los dominios, se definen las secciones que lo integran lo cual incluye las paredes, entrada, salida, rotor e inductor. Esto tiene vital importancia, pues permite identificar claramente cada parte de la geometría. Adicional, una vez establecido el dominio y las secciones que lo integran, se procede a realizar algunas operaciones de sustracción de cuerpos más conocidos como booleanos, esto implica la eliminación del cuerpo dejando el espacio vacío que ocuparía el mismo sin necesidad de que físicamente este presente. La primera sustracción es restarle al dominio el inductor eliminando los cuerpos, el segundo el dominio menos la zona de rotación preservando los cuerpos y finalmente la zona de rotación menos el rotor Savonius eliminando los cuerpos.

Mallado

Definida la geometría, el dominio y las partes que la integran en el entorno CFD, es posible pasar a la sección de discretización, la juega un papel fundamental en el análisis CFD, en dinámica de fluidos computacional discretizar es el proceso de dividir el dominio geométrico de un problema en elementos más pequeños, discretos y finitos, conocidos como celdas o elementos de malla. Estas celdas forman una red o malla que permite resolver numéricamente las ecuaciones gobernantes del flujo de fluidos (como las ecuaciones de Navier-Stokes) mediante métodos computacionales. El mallado define las regiones donde se calculan las variables del flujo, como velocidad, presión, temperatura o turbulencia, y su calidad influye directamente en la precisión y eficiencia de la simulación. [30] En la tabla (14) se muestra una lista de los métodos de mallado empleados:

Tabla 13: Elementos del Dominio Computacional

Sección	Tipo de Mallado	Dimensión
Dominio General	Elementos Hexaédricos	40 mm
Dominio Rotatorio	Elementos Tetraédricos	10 mm
Zona de Refinamiento	Elementos Tetraédricos	5 mm
Rotor	Elementos Tetraédricos	2 mm

Con esta configuración se ha alcanzado un número de elementos de 4,301,509, además se obtuvo un skewness de 0.88 este parámetro no permite definir la calidad de la malla y es un buen recurso para garantizar una buena resolución, dicho valor de 0.88 es aceptable para este tipo de análisis CFD. En la figura (21) se presenta una visualización del mallado en las diferentes secciones que conforman el dominio:

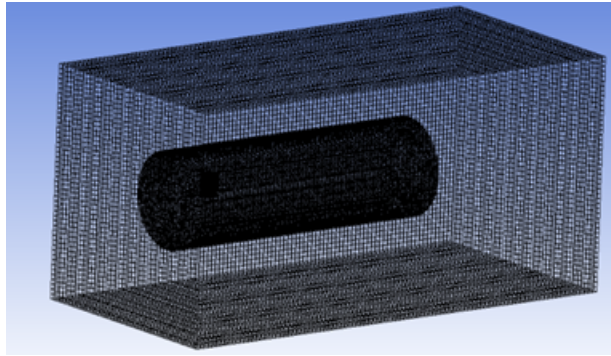


Figura 21: Mallado de Dominio General

En el mallado entre dominios se ha puesto énfasis en realizar una transición suave entre capas por medio de la configuración conocida como Growth Rate, el cual se ha configurado en un valor de 1.2 y nos permitió hacer una buena unión pese a tener elementos de forma y tamaños distintos. Los resultados visualmente se muestran en la figura (22) y figura (23):

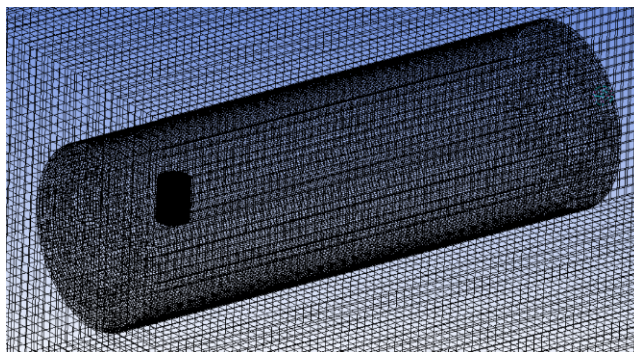


Figura 22: Mallado de Dominio de Refinamiento

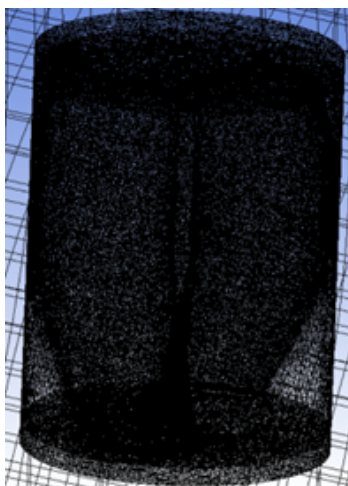


Figura 23: Mallado de Dominio Rotatorio

La prioridad de la discretización se ha enfocado en las palas del rotor que son el área de mayor intereses y donde se producen los efectos aerodinámicos más influyentes en el desempeño del rotor. Un mallado de capa límite es esencial para garantizar la correcta apreciación del fenómeno de desprendimiento; sin embargo, en geometrías complejas como la que se está analizando resulta complejo crear un mallado de capa límite por medio del uso de inflaciones en las palas del rotor, es por ello que se ha hecho uso de un refinamiento muy pequeño en los elementos de las palas que no permita obtener un buen control del desprendimiento de la capa límite garantizando buenos resultados en la resolución.

Configuración del Entorno CFD.

La configuración del solucionador en CFD es una etapa clave que define cómo se resolverán numéricamente las ecuaciones gobernantes del fluido (ecuaciones de Navier-Stokes) durante

la simulación. Esta configuración depende del tipo de problema físico y de las condiciones del análisis, pero resulta importante definir las condiciones de frontera, las condiciones del fluido, modelo de turbulencia y monitores a generar. La selección correcta de las opciones disponibles depende directamente de la experiencia que se tiene en este tipo de análisis, de la comprensión teórica de los conceptos que se involucran, así como de los recursos literarios que se usen para validar los modelos CFD. A continuación se muestra la configuración seleccionada para el presente análisis:

Tabla 14: Configuración CFD

Parámetro	Valor
Gravedad	9.81 m/s ²
Estado	Estacionario
Modelo de Turbulencia	K-Omega SST
Fluido	Aire
Densidad	1.225 (a nivel del mar)
Rotación	En sentido antihorario a 74 rad/s
Condiciones de Entrada	9 m/s
Inductor	Pared
Rotor	Pared
Esquema	SIMPLE
Gradiente	Green Gauss Node Based
Pressure	Second Order
Momentum	First Order
Turbulent Kinetic Energy	First Order
Specific Dissipation Rate	First Order
Inicialización	Hybrid
Iteraciones	1000
Reportes	Coefficiente de Momento - Y+

El estado seleccionado para este tipo de análisis es estacionario es decir no se analizará el cambio de las variables respecto al tiempo, el modelo de turbulencia K Omega SST es de los más usados en simulaciones de turbinas eólicas, ya que garantiza una buena resolución en las regiones cercanas a las paredes de los elementos que es donde normalmente ocurre el desprendimiento de la capa límite, así como en las regiones lejanas donde ocurren fenómenos de estela. Respecto al fluido implicado es aire que entra al dominio con una velocidad de 9 m/s con sus respectivos valores de viscosidad y densidad en condiciones estándar, el rotor gira a 74 rad/s que corresponde a aproximadamente 700 RPM (estos valores se han establecido para una velocidad específica de 0.7, la cual es usada en la principal fuente de referencia [46] y que nos permitirá validar los datos obtenidos. Tanto el inductor se han definido como una pared sólida que rodea las palas de rotor Savonius, el esquema usado es simple basado en los nodos, ya que se tiene una malla no estructurada de elementos de formas y tamaño variado. Los esquemas usados son de primer orden priorizando una convergencia para el caso del momento, energía cinética turbulenta y la disipación, para el caso de la presión se ha

establecido en segundo orden priorizando una buena resolución. La inicialización fue híbrida y con un número de iteraciones de 1000, monitorizando el coeficiente de momento y el Y+ para garantizar una buena descripción del desprendimiento de la capa límite.

Otro aspecto importante en un análisis CFD es la estabilidad en la escala de residuales porque sin ella, los resultados pueden ser inexactos debido a errores numéricos, inestabilidades o fluctuaciones, lo cual optimiza recursos computacionales al permitir detener la simulación en el punto óptimo y detecta problemas tempranos en mallas o condiciones de contorno [76]. La configuración previamente definida en el análisis CFD nos permitió obtener una escala de residuales estable, cabe mencionar que para un análisis de este tipo se espera lograr una estabilidad en valores de $10E-4$ a $10E-6$. En la figura (24) se presentan los valores de residuales obtenidos del análisis, como se puede observar existe valores en la escala inferior a $10E-5$ en la mayoría de los casos lo cual es aceptable para este tipo de estudios.

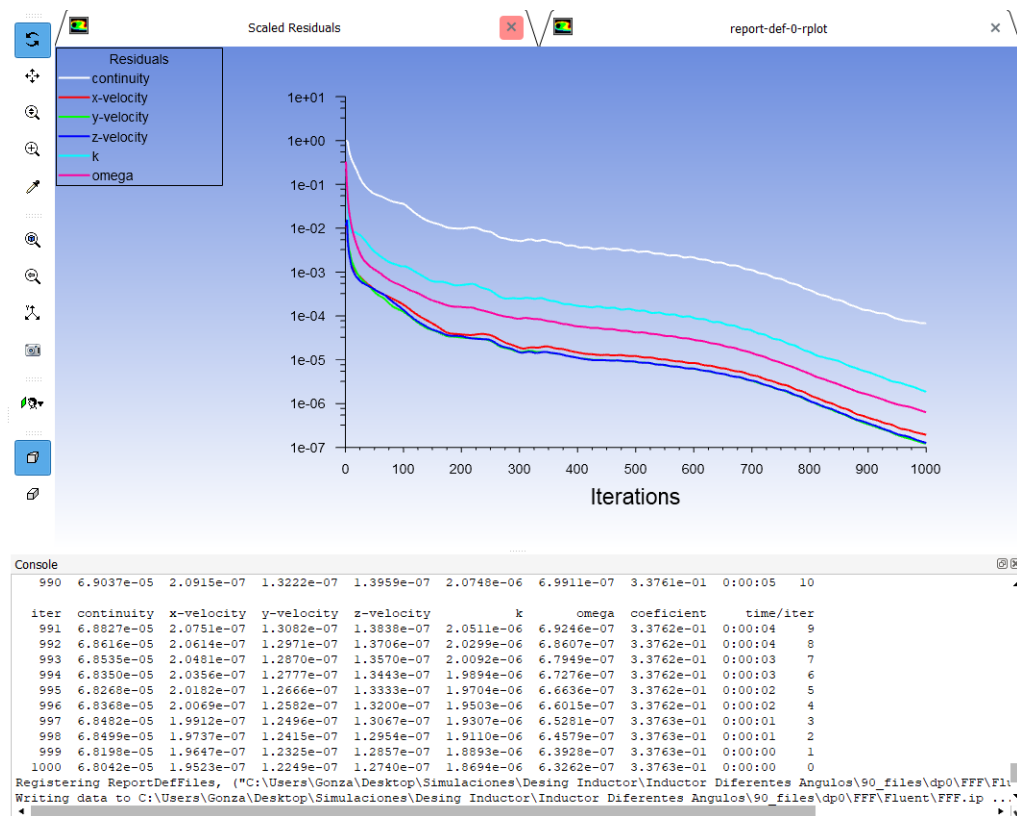


Figura 24: Escala de Residuales

Se puede visualizar que los valores obtenidos para el monitor de coeficiente de momento presenta repetibilidad a medida que avanzan las iteraciones con variaciones mínimas. Un mayor

número de iteraciones podría permitir alcanzar valores de residuales en una mejor escala, sin embargo, esto tiene que considerarse, ya que el tiempo de análisis también se aumentaría considerablemente.

Resultados

Los resultados obtenidos en el postprocesamiento CFD se muestran en la figura (25) y figura (26) de una forma visual, haciendo posible comprobar el comportamiento aerodinámico en las diferentes secciones que integran la geometría, en específico los contornos y vectores de presión, velocidad que describen el comportamiento del fluido dentro de la zona de análisis, esto mismo se ha realizado para una configuración con inductor y sin inductor con la intención de hacer una comparativa de ambos.

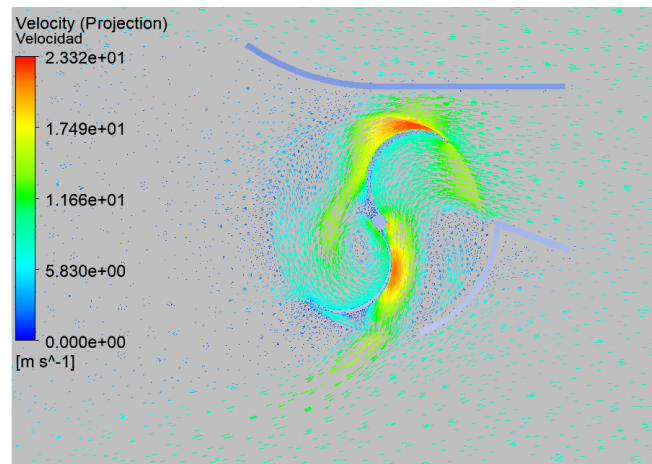


Figura 25: Vectores de Velocidad con Inductor

En el análisis con inductor (figura 25) se observa un vórtice muy organizado y concentrado en la zona central del rotor lo que sugiere una aceleración fuerte y focalizada del flujo, los vectores muestran una curvatura suave, menor separación y una zona de baja velocidad muy reducida detrás del rotor. Sin inductor (figura 26) se observa que el vórtice central es mucho más difuso y desorganizado, la distribución es menos focalizada el flujo se extiende más perdiendo energía en turbulencia, se aprecia una región de recirculación más amplia y una estela más gruesa y larga.

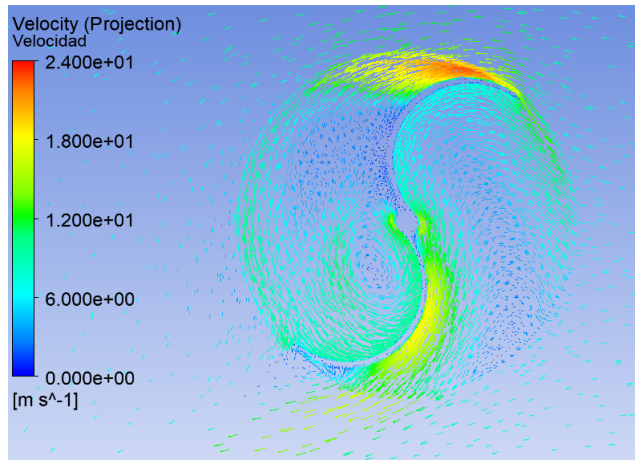


Figura 26: Vectores de Velocidad sin Inductor

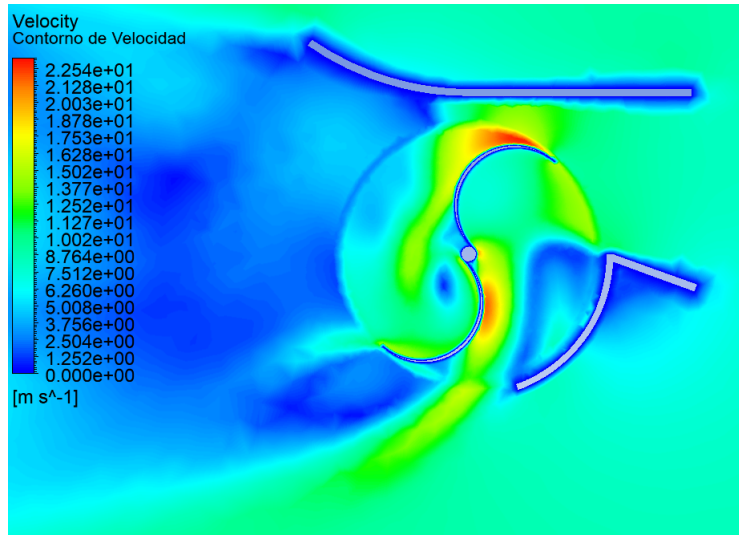


Figura 27: Contornos de Velocidad con Inductor

Con inductor (ver figura 27, figura 31 y figura 33) hay aceleración limpia y focalizada en la zona del rotor, la velocidad máxima está bien localizada y rodeada de gradientes fuertes pero ordenados, la estela es notablemente más delgada y se contrae rápidamente. Zonas de baja velocidad detrás del rotor son mucho menores, por lo tanto menor bloqueo del flujo. Sin inductor (ver figura 28 y figura 32) hay una distribución más difusa, la estela es claramente más ancha y larga, con una zona de baja velocidad muy extendida axialmente, mayor área en velocidades intermedias-bajas detrás y mayor disipación viscosa y pérdidas energéticas, el flujo parece despegarse más y generar una estela más turbulenta.

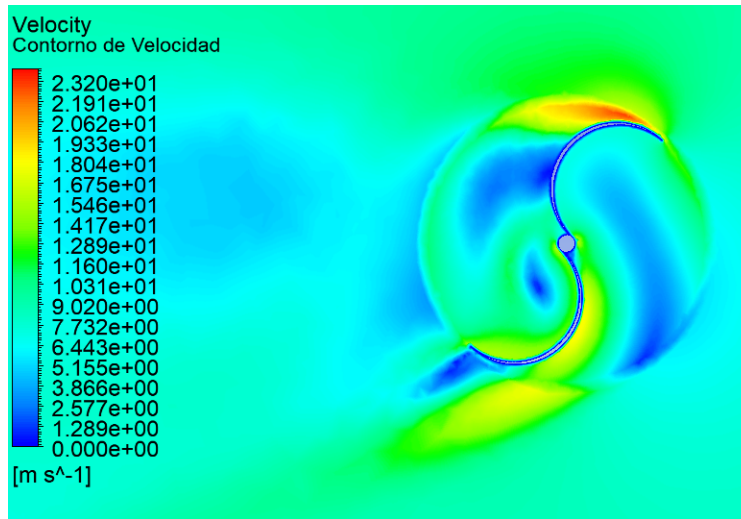


Figura 28: Contornos de Velocidad sin Inductor

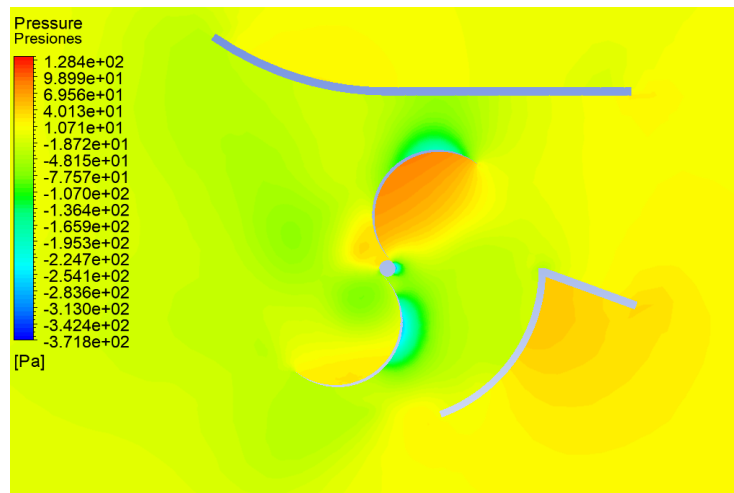


Figura 29: Contornos de Presión con Inductor

Con inductor (figura 29) hay un buen gradiente de presión radial y axial bien definida, zona de alta presión delante del inductor y baja presión muy intensa en la región central-posterior. La recuperación de presión detrás del rotor es relativamente rápida, la estela no se mantiene con depresión tan fuerte durante tanta distancia y la transiciones de presión bastante suaves con poca separación abrupta. Sin inductor (figura 30) la zona de baja presión central es menos intensa y mucho más extendida en sentido axial, se observan gradientes más caóticos y zonas de transición brusca indicio de separación. Hay una recuperación de presión mucho más lenta, mayor área en depresión y por lo tanto mayor pérdida de energía cinética en la estela.

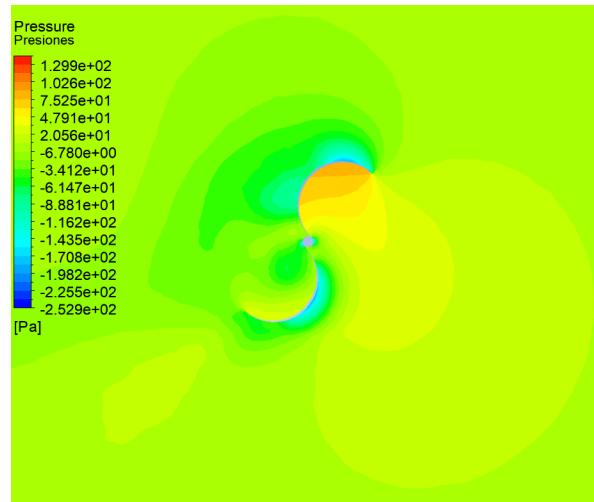


Figura 30: Contornos de Presión sin Inductor

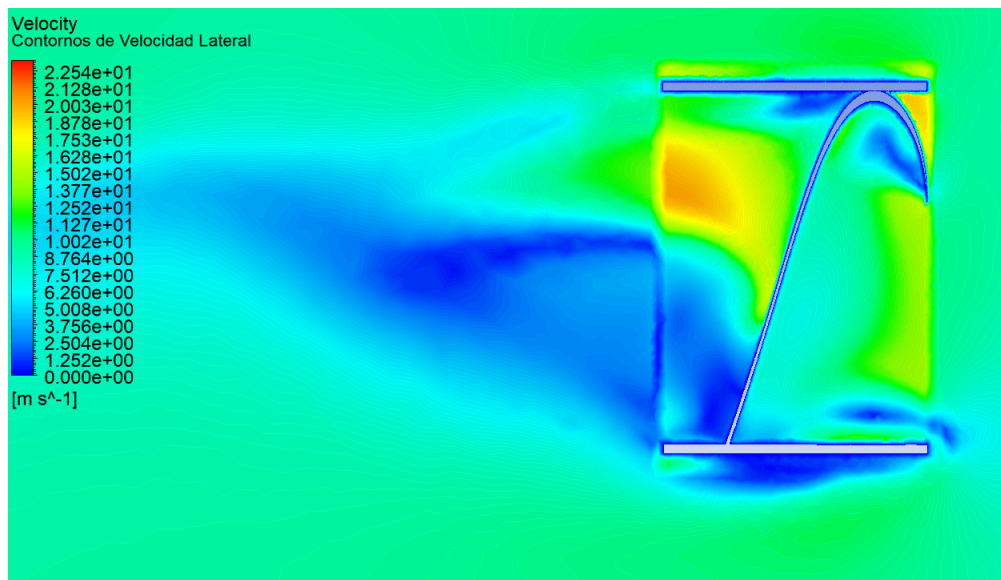


Figura 31: Contornos de Velocidad Lateral con Inductor

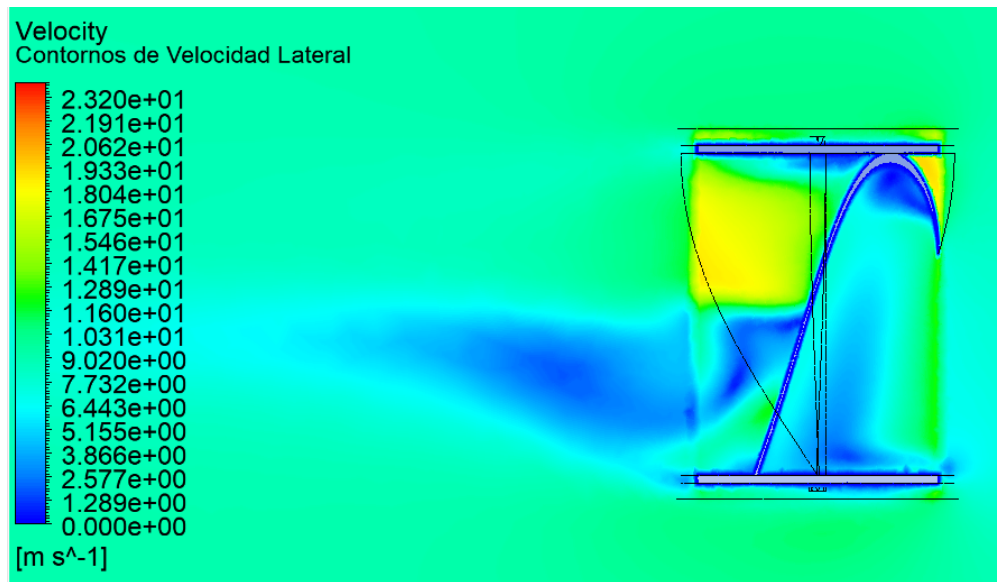


Figura 32: Contornos de Velocidad Lateral sin Inductor

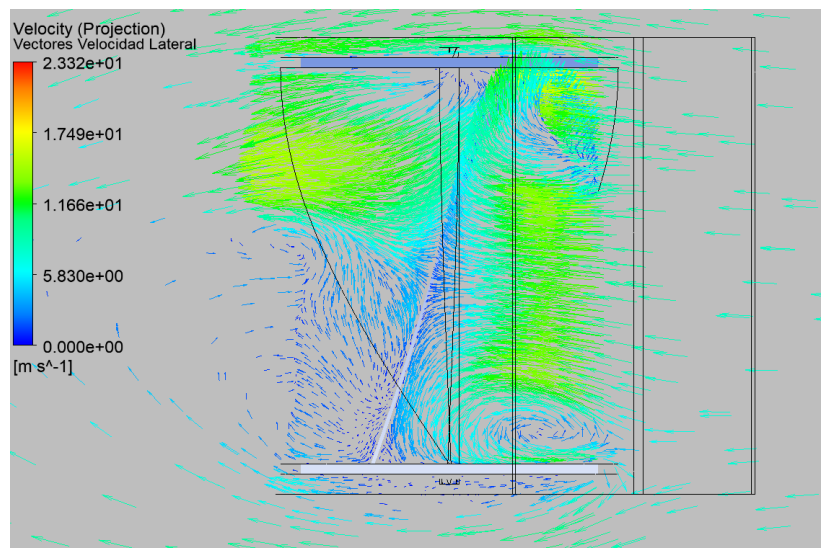


Figura 33: Vectores de Velocidad Lateral con Inductor

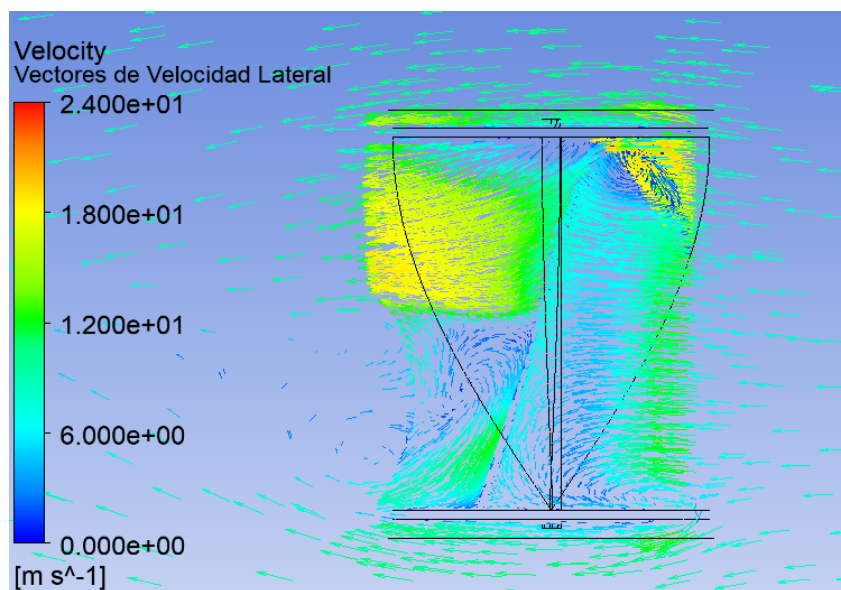


Figura 34: Contornos de Velocidad Lateral sin Inductor

El resumen de los resultados obtenidos en el posprocesamiento se muestra en la tabla (16) destacando los aspectos de cada una de las configuraciones.

Tabla 15: Comparación de características aerodinámicas con y sin inductor

Aspecto	Sin inductor	Con inductor	Ventajas
Vorticidad	Difusa, desordenado	Compacto	Mejor transferencia de momento angular
Estela	Ancha y larga	Delgada y corta	Menor pérdida de energía
Gradiente de Presión	Menos intenso, recuperación lenta	Muy intenso y recuperación rápida	Mayor ΔP , mayor torque y C_p
Zonas de baja velocidad	Grandes y extendidas	Reducidas	Menor bloqueo del flujo y menor disipación viscosa
Impacto en C_p	Moderado-bajo	Alto (especialmente a bajo TSR)	Mejora significativa de la eficiencia global

Análisis de Convergencia de Malla

Adicional a la visualización del comportamiento de la presión y la velocidad en las diferentes zonas del rotor se han obtenido valores para el coeficiente de momento con diferentes refinamientos a fin de realizar un análisis de independencia de malla, los valores que se han variado

son el tamaño de elemento de la malla global, el tamaño de elemento en el refinamiento en la zona de rotación y en el rotor. Los resultados de coeficiente de momento se muestran en la tabla (17):

Tabla 16: Análisis de convergencia de malla

N° Elementos	C_m	Error medio relativo (%)
898 174	0.30222	–
985 947	0.30780	1.85
1 027 213	0.29854	3.01
1 182 547	0.29080	2.59
1 679 277	0.28463	2.12
2 073 330	0.27905	1.96
3 361 436	0.27201	2.52
4 303 762	0.27441	0.88

Es importante mencionar que los resultados obtenidos son para una velocidad de viento de 9 m/s, un TSR de 0.7 a un ángulo de 90° es decir con la pala cóncava en mayor exposición frente a la entrada del inductor este paso es indispensable para descartar la influencia del número de elementos en los resultados obtenidos. Se muestra en la figura (34) los correspondientes valores obtenidos:

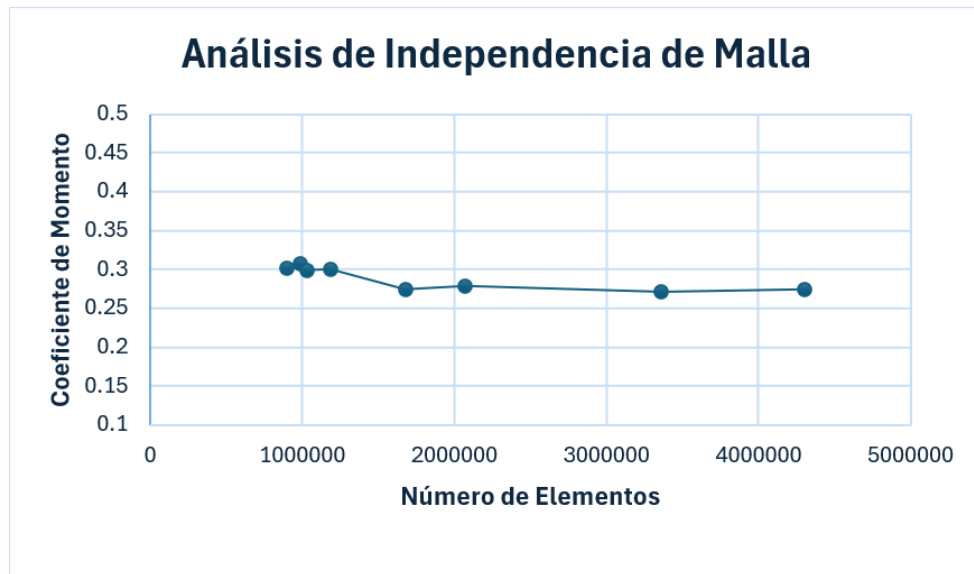


Figura 34: Análisis de Independencia de Malla

El análisis de independencia refleja una variación aceptable (inferior al 5 por ciento en todos los casos) aún para una cantidad baja de elementos, es el caso de una malla poco refinada con valores inferiores a un millón se tienen resultados que rondan los 0.30 en C_p , después subiendo la cantidad de elementos a una malla intermedia de dos millones baja hasta 0.27 y permanece en ese rango hasta una malla muy refinada de 4 millones de elementos, es decir añadir o quitar elementos en ya no tiene influencia en los resultados. Esto indica que, a partir de aproximadamente 2 millones de elementos, añadir o quitar elementos ya no tiene una influencia significativa en los resultados, confirmando que se ha alcanzado la independencia de malla. Este comportamiento es típico en simulaciones CFD de turbinas de energía eólica de eje vertical tipo Savonius, donde se observa una convergencia aceptable del coeficiente de momento y potencia una vez superada la zona de mallas gruesas, y los valores se estabilizan en rangos estrechos con refinamientos posteriores [77]. Esto tiene un impacto directo en el tiempo de cómputo y los recursos disponibles, en la mayoría de los casos resulta indispensable optimizar al máximo el uso de los mismos, por ello un análisis de este tipo ayuda identificar el punto donde invertir más tiempo no tendría una relevancia importante en los resultados, un buen análisis podría reducir el tiempo de cálculo de varias horas a fracciones de hora, dando lugar a la obtención de resultados de una manera eficiente y con menos consumo de energía.

Resultados de C_m , C_p , Torque y Potencia; Análisis CFD del Rotor Savonius.

Por otro lado, se han realizado el análisis del comportamiento de los valores de coeficiente de momento en diferentes posiciones del rotor Savonius con y sin inductor completando una vuelta, esto permitió encontrar el valor de potencia para cada posición e identificar la posición del ángulo azimutal en la cual existe el mejor C_m , lo anterior se realizó en ambos casos, para lograrlo se hizo uso de la parametrización, rotando cada 15 grados (figura 35), adicionalmente se encontró el valor promedio de las rotaciones lo cual corresponde a un C_m de una vuelta completa, obtenido dicho valor de C_m y haciendo uso de las ecuaciones 14, 15 y 16 para obtener los valores de momento, potencia y coeficiente de potencia, los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 17: Resultados de simulación CFD - Rotor Savonius sin inductor

Ángulo (°)	No. Elementos	Cm	Torque	Potencia	Cp
15	4310701	0.043127533	0.006183631	0.458316185	0.030189273
30	4308431	0.089966014	0.012899338	0.956068606	0.06297621
45	4307364	0.17746691	0.025445228	1.885940409	0.124226837
60	4311887	0.24752526	0.035490203	2.630450319	0.173267682
75	4307639	0.27065554	0.038806625	2.876255747	0.189458878
90	4313738	0.28856188	0.041374038	3.066546377	0.201993316
105	4312175	0.24560179	0.035214415	2.610009608	0.171921253
120	4309431	0.17314108	0.02482499	1.839969824	0.121198756
135	4307697	0.13036317	0.018691488	1.385369082	0.091254219
150	4298254	0.10705252	0.015349204	1.137646862	0.074936764
165	4307700	0.066176228	0.009488356	0.70325461	0.04632336
180	4306447	0.040773936	0.005846172	0.433304516	0.028541755
Promedios		0.156700988	0.022467807	1.665261012	0.109690692

Tabla 18: Resultados de simulación CFD - Rotor Savonius con inductor

Ángulo	No. Elementos	Cm	Torque	Potencia	Cp
15°	4302484	0.12925038	0.01853936	1.56976336	0.10343004
30°	4300308	0.13742287	0.01970370	1.66901999	0.10993829
45°	4302565	0.17930904	0.01569728	1.32757831	0.08794447
60°	4301509	0.23464288	0.03364313	2.84770628	0.18774304
75°	4301949	0.26004405	0.03728500	3.15825925	0.20803444
90°	4303762	0.2944409	0.04221697	3.57602592	0.23555527
105°	4304105	0.27034546	0.03876218	3.28383442	0.21627654
120°	4301656	0.17865678	0.025615831	2.169811605	0.142925424
135°	4301356	0.15451024	0.02215370	1.87665489	0.12368019
150°	4298254	0.13040768	0.01870779	1.58464896	0.10436119
165°	4289967	0.11710277	0.01677934	1.42131258	0.09362816
180°	4300602	0.11101203	0.015916919	1.348256646	0.088809624
Promedios	-	0.183094855	0.026252163	2.22371264	0.146475884

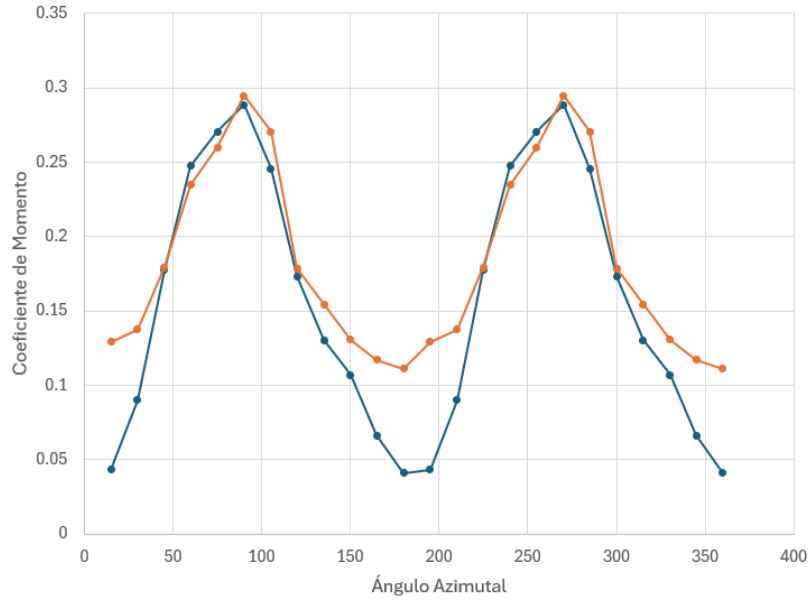


Figura 35: Coeficiente de Momento a Diferentes Ángulos Azimutal

Los valores obtenidos de las simulaciones usando CFD corresponden a diferentes ángulos azimutales para una vuelta completa del rotor Savonius y nos permiten visualizar gráficamente (figura 35) y analíticamente (tabla 18 y 19) la mejora de incorporar un inductor al rotor Savonius, considerando los valores de coeficiente de momento y de potencia encontrados, **para la configuración sin inductor se tiene un valor de potencia de 1.6653 watts y con inductor de 2.2237 watts, logrando una mejora en la eficiencia del 25.11 por ciento.** Resulta interesante que los valores de C_p de mayor magnitud se obtienen para los ángulos que van desde 75° a 105° en las configuraciones con y sin inductor, lo cual corresponde a la etapa donde la pala cóncava está más expuesta al flujo de aire. Otro aspecto interesante es el mayor torque predominante en las posiciones de ángulo azimutal que van desde 120° a 230° , esto podría contribuir significativamente a un mejor arranque.

Los estudios de turbinas eólicas de baja potencia presentan al rotor Savonius como un elemento de baja potencia debido a su condición de operación exclusiva por fuerzas de arrastre, por ello maximizar su eficiencia por medio de dispositivos o configuraciones adicionales tiene un impacto importante, a continuación se muestran los datos caracterizados por Erick Hau para diferentes turbinas eólicas [1], mostrando los valores de velocidad específica donde predomina su operatividad así como su correspondiente coeficiente de potencia según sea el TSR (ver figura 36 y 37).

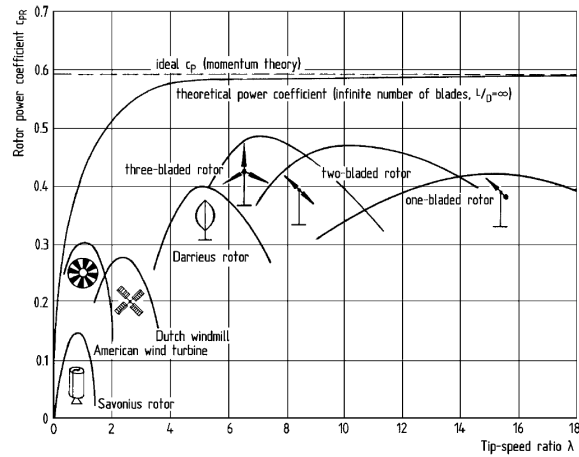


Figura 36: Coeficiente de Potencia (C_p) para Diferentes Turbinas Eólicas

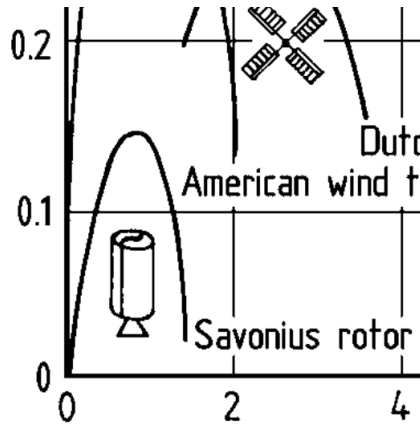


Figura 37: Coeficiente de Potencia (C_p) para Turbinas Savonius

Como se puede observar existe para el rotor Savonius un rango de operatividad de TSR de 0 a máximo 1.5; sin embargo, los estudios demuestran que el punto de mayor eficiencia se localiza entre 0.6 y 0.8 en configuraciones sin elementos extra como concentradores de flujo, cortinas protectoras o inductores. Para el presente caso de estudio, el valor obtenido de las simulaciones CFD para el caso de sin inductor y para una velocidad específica de 0.7 se obtiene un valor de 0.1096 de coeficiente de potencia, mientras que para la configuración con inductor el cual opera a una velocidad específica de 0.77 se obtiene un valor de 0.1464 de C_p , estos valores están dentro del rango de operación de los rotores Savonius como se puede comprobar en la gráfica anterior, **respecto al valor de 0.1464 del rotor con inductor tenemos un valor por encima de la curva de valores C_p , esto resalta la mejora significativa de incorporar una mejora aerodinámica al rotor y su impacto directo en sus prestaciones de rendimiento.**

CP y Cm a Diferentes Velocidades Específicas (TSR).

El análisis CFD del rotor Savonius adicionalmente se ha realizado a velocidades específicas diferentes a la del diseño a fin de identificar el impacto de la velocidad del recurso eólico y las rotaciones de la turbina Savonius sobre los parámetros a analizar. La variación de la velocidad específica (TSR) se realizó desde un rango de 0.4 a 1, lo cual es un rango aceptable para turbinas eólicas de eje vertical tipo Savonius de baja potencia. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla (20, 21, 22 y 23):

Tabla 19: Análisis CFD TSR 0.4 - Rotor Savonius con inductor

Ángulo	No. Elementos	Cm	Torque	Potencia	Cp
15	1996522	0.04167	0.00597465	0.442124086	0.03255
30	2001451	0.04692	0.0067274	0.497827264	0.03776
45	1999584	0.05128	0.00735253	0.544087428	0.04047
60	2008108	0.05489	0.00787014	0.582389995	0.04223
75	2000790	0.05876	0.00842502	0.623451195	0.04641
90	2002682	0.06512	0.00933691	0.690931617	0.05175
105	1974386	0.06247	0.00895696	0.662814774	0.04531
120	1974386	0.05931	0.00850388	0.629286766	0.04431
135	1978839	0.05594	0.00802068	0.59353063	0.04303
150	1991255	0.05182	0.00742996	0.549816898	0.03833
165	1992527	0.04765	0.00683206	0.505572659	0.0357
180	1998242	0.04276	0.00613093	0.453689127	0.03343
Promedios		0.05644956	0.00763009	0.564626871	0.040949825

Tabla 20: Análisis CFD TSR 0.6 - Rotor Savonius con inductor

Ángulo	No. Elementos	Cm	Torque	Potencia	Cp
15	4006522	0.11708027	0.01678698	1.066467203	0.070248162
30	4001451	0.14465089	0.02074006	1.317603983	0.086790534
45	4299584	0.15475345	0.02218857	1.409626737	0.09285207
60	4008108	0.22133043	0.03173438	2.016066794	0.132798258
75	4000790	0.21068408	0.03020791	1.919090736	0.126410448
90	4002682	0.24768861	0.03551362	2.256159634	0.148613166
105	4288534	0.22783615	0.03266718	2.075326454	0.13670169
120	4074386	0.20798369	0.02982073	1.894493275	0.124790214
135	4078839	0.18676074	0.02677778	1.7011765	0.112056444
150	4091255	0.16658641	0.02388518	1.517411454	0.099951846
165	4092527	0.14577104	0.02090067	1.327807267	0.087462624
180	4098242	0.12483414	0.01789873	1.13709608	0.074900484
Promedios		0.179663325	0.02576015	1.636527176	0.107797995

Tabla 21: Análisis CFD TSR 0.7 - Rotor Savonius con inductor

Ángulo	No. Elementos	Cm	Torque	Potencia	Cp
15	4302484	0.12295551	0.017629376	1.306647897	0.086068857
30	4001451	0.11871957	0.017022027	1.261632574	0.083103699
45	4009584	0.10712154	0.0153591	1.138380338	0.074985078
60	4008108	0.26004305	0.037285005	2.763476842	0.182030135
75	4301949	0.22500032	0.032260574	2.391077838	0.157500224
90	4002682	0.2944409	0.042216973	3.129022708	0.20610863
105	4304105	0.27151322	0.038929599	2.88537031	0.190059254
120	4301085	0.21920198	0.031429207	2.329458893	0.153441386
135	4301356	0.11420903	0.016375305	1.213699076	0.079946321
150	4298254	0.10979053	0.01574178	1.166743688	0.076853371
165	4298967	0.11702727	0.016779385	1.243648506	0.081919089
180	4300602	0.12461638	0.017867512	1.324297959	0.087231466
Promedios	-	0.173719942	0.024907987	1.846121386	0.121603959

Tabla 22: Análisis CFD TSR 0.8 - Rotor Savonius con inductor

Ángulo	No. Elementos	Cm	Torque	Potencia	Cp
15°	4302484	0.12925038	0.01853936	1.56976336	0.10343004
30°	4300308	0.13742287	0.01970370	1.66901999	0.10993829
45°	4302565	0.17930904	0.01569728	1.32757831	0.08794447
60°	4301509	0.23464288	0.03364313	2.84770628	0.18774304
75°	4301949	0.26004405	0.03728500	3.15825925	0.20803444
90°	4303762	0.2944409	0.04221697	3.57602592	0.23555527
105°	4304105	0.27034546	0.03876218	3.28383442	0.21627654
120°	4301656	0.17865678	0.025615831	2.169811605	0.142925424
135°	4301356	0.15451024	0.02215370	1.87665489	0.12368019
150°	4298254	0.13040768	0.01870779	1.58464896	0.10436119
165°	4289967	0.11710277	0.01677934	1.42131258	0.09362816
180°	4300602	0.11101203	0.015916919	1.348256646	0.088809624
Promedios	-	0.183094855	0.026252163	2.22371264	0.146475884

Nuevamente, podemos observar como para las diferentes velocidades específicas tenemos los valores máximos de Cm y Cp para las posiciones del rango entre 75 y 105 grados, correspondiendo con la parte donde está mayormente expuesta la pala cóncava del rotor. Es importante indicar que la configuración utilizada para realizar la variación del TSR consistió y mantener fija la velocidad de viento y hacer la variación de las revoluciones del rotor según el valor correspondiente a cada TSR, lo cual fue previamente calculado. Para un valor de TSR 0.4 tenemos una velocidad de rotación de 44.35 rad/s, para 0.6 es de 63.52 rad/s, 0.7 equivale a 74.11 rad/s y para 0.8 s es de 84.70 rad/s.

Se muestra en la gráfica (38) correspondiente a los valores de coeficiente momento a diferentes valores de velocidad específica a fin de identificar la tendencia del comportamiento aerodinámico:

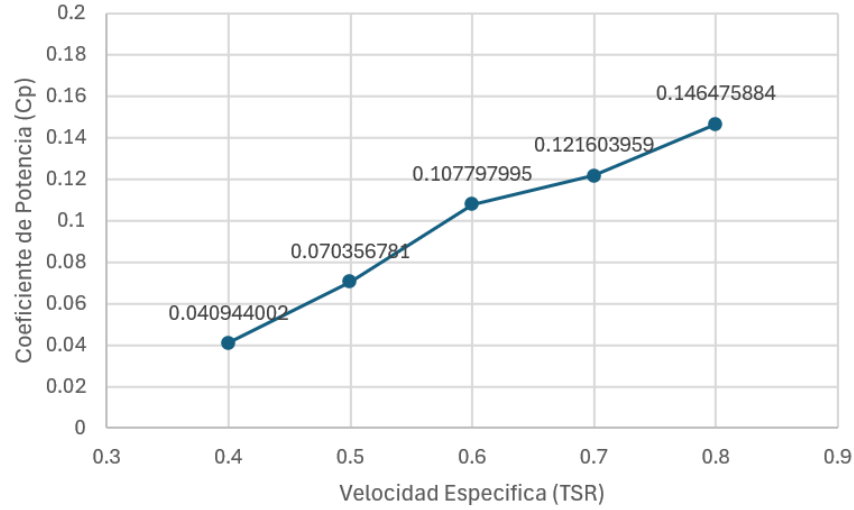


Figura 38: Análisis CFD. Coeficiente de Potencia para Diferentes Velocidades Específicas.

Las gráficas TSR vs C_p y C_m son (ver figura 39) una de las herramientas más importantes en el análisis aerodinámico de turbinas eólicas, ya que permite evaluar directamente la eficiencia energética del rotor bajo diferentes condiciones de operación [52]. Como se puede visualizar existe un aumento importante en el C_p y el C_m a medida que el valor de TSR aumenta, eso es de esperarse, ya que existe una estrecha relación con la velocidad de flujo y de rotación. Los valores anteriores corresponden para la configuración con inductor incorporado.

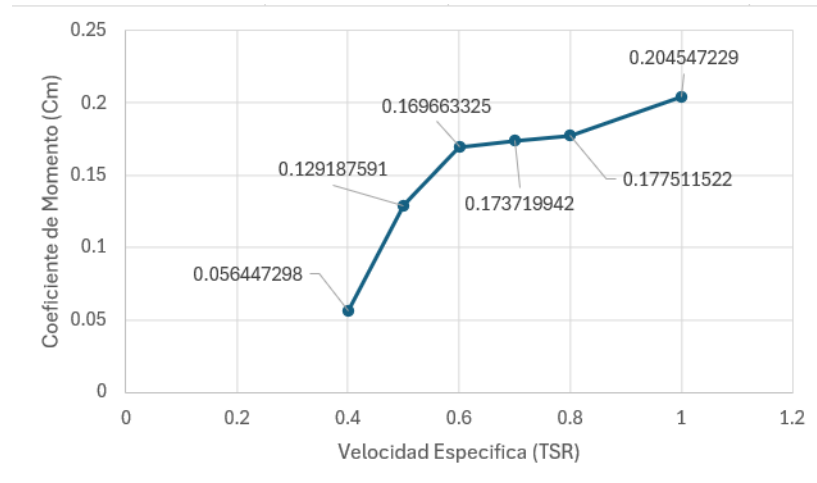


Figura 39: Análisis CFD. Coeficiente de Momento para Diferentes Velocidades Específicas.

Manufactura de Rotor e Inductor.

Aprobadas las fases de diseño y simulación se realiza la fabricación del inductor con la configuración óptima identificada en la fase de simulación, esto permite tener físicamente el rotor e inductor a fin de poder realizarle pruebas dentro del túnel de viento, la manufactura de los elementos se hará por medio de impresión 3D (figura 40), el material a utilizar es filamento PLA (ácido poliláctico) y la escala será 1:1, el dispositivo utilizado para esta labor fue una impresora de la marca Bambu-Lab A1 la cual tiene un tamaño del área de impresión de 18 cm de largo, 18 cm de ancho y 18 cm de alto. Con esto se cumple la secuencia de diseñar, manufacturar y analizar el rotor con inductor.

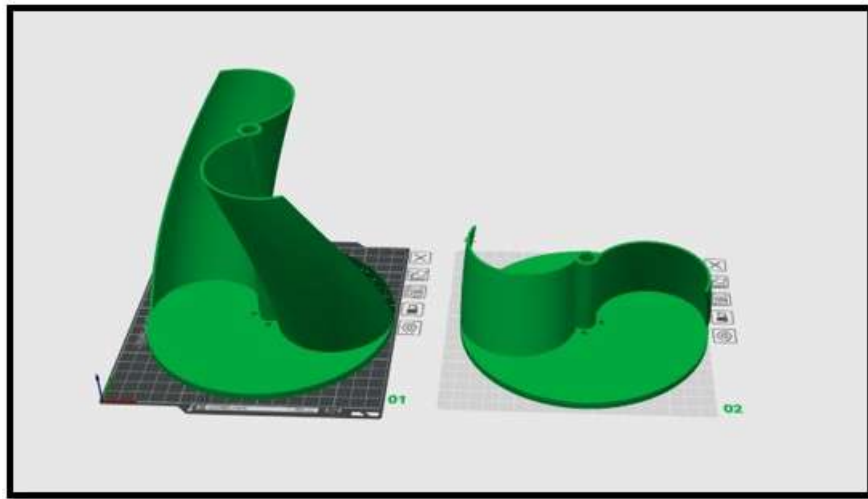


Figura 40: Impresión 3D Rotor Savonius

El rotor incluye un soporte en la parte central donde será montado el eje del mismo, la medida establecida previamente fue de 10 mm. El eje seleccionado es de acero cromado de fabricación china, este elemento facilitó la instalación de rodamientos y una buena lubricación, tiene un diametro de 10 mm y una longitud de 500 mm. A fin de lograr el montaje y acoplamiento del eje al rotor se ha hecho uso de bridas de fijación, las mismas van atornilladas a la base superior e inferior (figura 41 y 42):

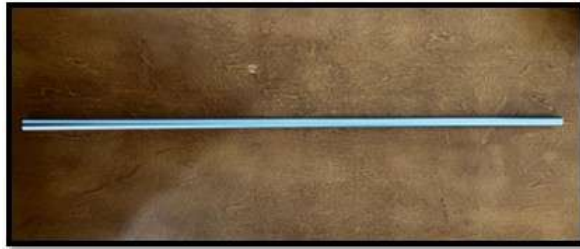


Figura 41: Eje de 10 mm para Rotor Savonius



Figura 42: Bridas de Unión.

Las piezas antes mostradas no son de acceso comercial en la zona, por lo que fue necesario obtenerlas a través de ventas en línea, esto complico los datos técnicos a profundidad, sin embargo su funcionamiento para el presente analisis resulto correcto.

La unión de las piezas anteriores permitió obtener una sola pieza (ver figura 43):



Figura 43: Rotor Savonius con Eje.

Una vez que se tiene el rotor manufacturado se seguirá el mismo procedimiento para el inductor, el cual también fue impreso en 3D usando PLA en el dispositivo denominado Bambu-Lab A1, debido a sus dimensiones, se seccionó y se le añadieron los soportes necesarios para finalmente ser ensamblados como una sola pieza como se muestra en la figura (43) y figura (44).

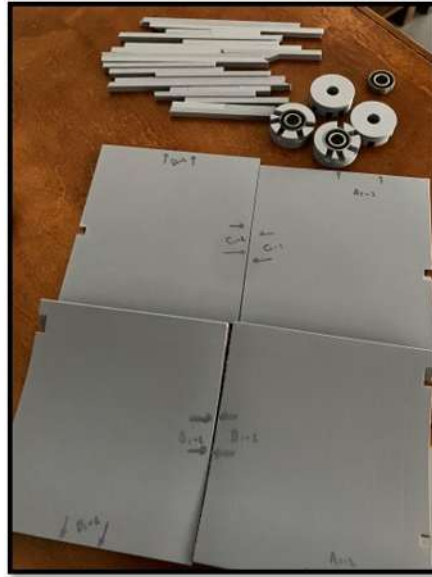


Figura 43: Manufactura Inductor.

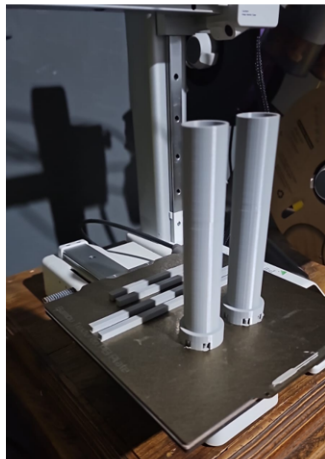


Figura 44: Soportes y Chumacera de Inductor.

El siguiente paso a realizar es el montaje del rotor sobre una base solida que permita instarlo en la sección de pruebas, se hará uso de acero para este proposito, la sección de pruebas tiene un salida de 60 cm cuadrados, el rotor debe centrarse en el mismo. La propuesta de diseño se muestra en la figura (45):



Figura 45: Estructura Base para Montaje de Rotor

Como se puede observar la estructura metálica cumple la función de soportar las chumace-
ras que sujetan los rodamientos donde se monta el eje del rotor, pero además también el eje
del inductor, la configuración -tal como se estableció en la sección geometría del diseño del
inductor- cumple una triple función canalizar el flujo de aire a la pala cóncava, proteger la pala
convexa y al mismo tiempo autoalinearse en la dirección predominante del flujo de aire-, por
ello la necesidad de tener un movimiento independiente y libre en la estructura del inductor sin
afectar el movimiento del rotor. Esta primera configuración nos permitió alinear los cuerpos
del inductor y del rotor respecto al túnel de viento; sin embargo, no fue la opción definitiva,
pues la instalación de la instrumentación hizo necesario añadir algunos otros elementos.

Una vez que se logró tener centrado el rotor-inductor respecto a la sección de pruebas, se hizo
necesario añadir los soportes necesarios para la base del dinamómetro, que será el instrumen-
to principal para hacer las mediciones correspondientes de velocidad de rotación, torque y
potencia. De igual manera se creó la base que sujetara el generador y lo mantendrá alineado
al eje del dinamómetro y este a su vez al eje del rotor, esto último usando acoplamientos
impresos en 3D (ver figura 46 y figura 47).

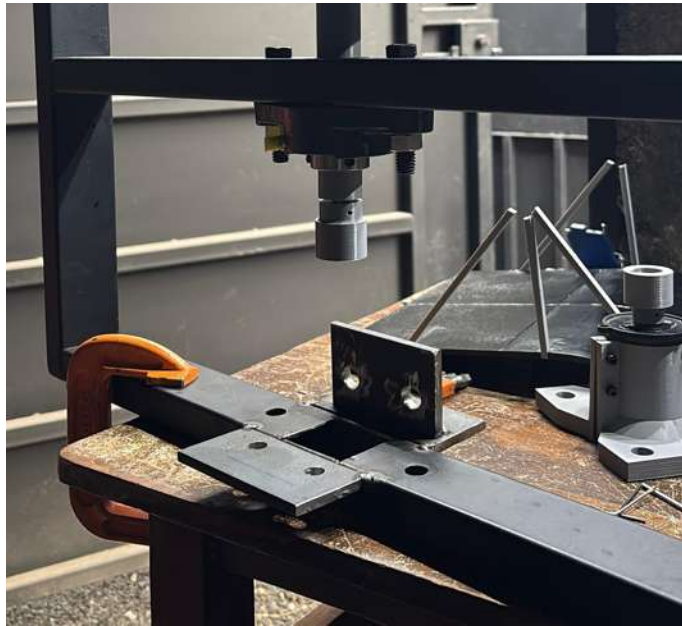


Figura 46: Soporte y Acoplamiento de Dinamómetro.



Figura 47: Soporte y Acoplamiento de Generador.

La manufactura de estas piezas requirió de una alta precisión en las mediciones para lograr poder hacer el ensamble correcto sin perturbaciones por desalineamiento, mal ajuste o falta de espacio, se crearon barrenos necesarios en la estructura metálica para fijarla a la sección frontal que se encuentra en la zona de pruebas, así mismo se barrenaron agujeros en los acoplamientos que permitieron introducir opresores para una correcta sujeción. El ensamble final de la estructura con todos sus elementos (rotor, inductor, dinamómetro, generador y veleta) incorporados se muestran en la figura (48):



Figura 48: Ensamble Final de Rotor-Inductor.

Se puede observar el rotor Savonius frente a la sección de pruebas donde se realizarán mediciones de rendimiento, a fin de evitar las vibraciones al máximo se hizo la sujeción de la estructura en diferentes puntos, el principal reto fue lograr una correcta alineación de todos los elementos implicados y así obtener mediciones certeras.

Diseño de Veleta

Las turbinas eólicas de gran escala incorporan una veleta en la góndola o en sus proximidades, junto con un motor que gira la turbina sobre el eje de guiñada para mantenerla alineada con la dirección del viento detectada. Este mecanismo se conoce como sistema de guiñada activa. Este mismo sistema permite orientar la turbina en sentido contrario al viento durante eventos meteorológicos extremos —como tormentas, ciclones, tifones o huracanes—, reduciendo las cargas aerodinámicas sobre el rotor y protegiendo la estructura que la conforma. En cambio, la mayoría de los aerogeneradores de pequeña potencia emplean un sistema de guiñada libre o pasivo. En estos diseños, el rotor se coloca a barlovento (delante) de la torre y el generador, y una aleta de cola se encarga de mantener la turbina orientada hacia el viento. Esta solución, mucho más sencilla, contribuye a reducir los costes de fabricación y facilita las tareas de mantenimiento. Aunque mecánicamente simple, la aerodinámica de la aleta de cola resulta compleja, ya que la velocidad de giro no está controlada y depende directamente de las condiciones del viento. El comportamiento general del sistema de guiñada libre es dependiente del diseño de la aleta, especialmente en la fase de arranque, cuando las palas aportan poca estabilidad direccional [78].

Los diseños de alas en flecha son habituales en turbinas eólicas de baja escala, y su forma más básica —el ala delta— ha sido ampliamente estudiada. Estas alas no solo resultan estéticamente atractivas, fáciles de fabricar y estructuralmente robustas, sino que también ofrecen características aerodinámicas favorables y bien documentadas. Por ello, la teoría aplicada al diseño de las aletas de cola se basa principalmente en la aerodinámica del ala delta.

La figura (48) define la geometría básica de una aleta de cola de ala delta: la cuerda es c , la envergadura es b y el alargamiento, AR , es $2b/c$. Teóricamente, el centro de presión en un ala delta se encuentra a $2c/3$ del ápice, por lo que la distancia del momento r debe medirse desde este punto hasta el eje de guiñada. En la práctica, $2c/3$ suele ser pequeño en comparación con la longitud del brazo de cola y , a menudo, puede despreciarse [78].

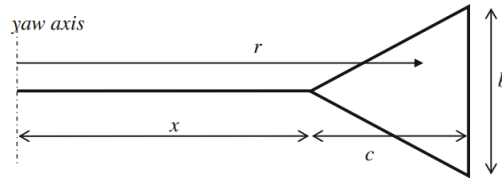


Figura 48: Variables de Veleta

A diferencia de la teoría, en este estudio se pretende controlar el giro del inductor no de rotor, sin embargo el principio de funcionamiento de la aleta de cola es el mismo. El primer paso para el diseño de la veleta consistió en encontrar el centro de masa del inductor, que es el elemento que la veleta controlará, para ello se hará uso de un software de diseño, que nos permite identificar las propiedades del inductor, dicho software es Solidworks 2023, los resultados reportados por el mismo se muestran en la tabla (24) y figura (49).

Tabla 23: Propiedades Geométricas y de Masa del Inductor.

Propiedad	Valor
Masa	415 g
Volumen	825970.51 mm ³
Área de superficie	371466.83 mm ²
Centro de masa	(mm)
X	-72.96
Y	104.57
Z	52.26

El centro de masa del elemento inductor se puede visualizar en la siguiente imagen:

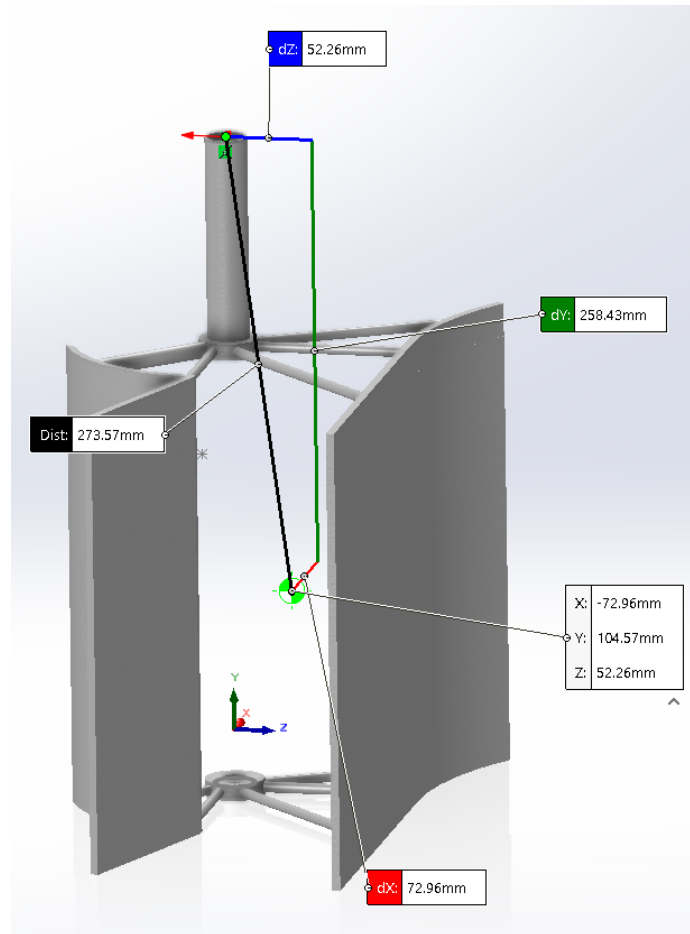


Figura 49: Centro de Masa del Inductor Respecto a la Vela.

La veleta se montará en el eje del inductor, de esta manera se toma la distancia del centro del eje al punto del centro de masa del inductor, los valores de distancia en el eje X equivale a 72.96 mm, para el eje Y 258.43 mm y para el eje Z un valor de 52.26 mm. Por lo tanto, los momentos de inercia producidos por el propio peso del inductor respecto a la posición de la veleta que coincide con el eje del rotor y el inductor se muestran a continuación:

Datos proporcionados:

- Masa de la pieza: $m = 415 \text{ g} = 0,415 \text{ kg}$
- Aceleración de la gravedad: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- Componentes del vector desde el punto superior al centro de masa:
 - $dx = 72,96 \text{ mm}$ (componente en X)
 - $dy = 258,43 \text{ mm}$ (componente vertical en Y)
 - $dz = 52,26 \text{ mm}$ (componente en Z)
- Distancia total (diagonal): $273,57 \text{ mm}$ (solo para verificación)

Paso 1: Determinación del brazo de palanca:

El momento debido al peso solo depende de la componente horizontal (perpendicular a la dirección de la gravedad). Asumiendo que la gravedad actúa en dirección $-Y$ (vertical), el brazo de palanca es la distancia en el plano XZ :

$$\begin{aligned}
 d &= \sqrt{(dx)^2 + (dz)^2} \\
 &= \sqrt{(72,96)^2 + (52,26)^2} \\
 &= \sqrt{8054,2292} \\
 &\approx 89,745 \text{ mm} \\
 d &= 0,089745 \text{ m}
 \end{aligned} \tag{39}$$

Paso 2: Cálculo de la fuerza:

$$\begin{aligned}
 W &= m \cdot g \\
 &= 0,415 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \\
 &\approx 4,07 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{40}$$

Paso 3: Cálculo del momento:

$$\begin{aligned}
 M &= W \cdot d \\
 &= 4,07 \text{ N} \times 0,089745 \text{ m} \\
 &\approx 0,36 \text{ N} \cdot \text{m}
 \end{aligned} \tag{41}$$

El momento resultante producido por el peso es:

$$M \approx 0,36 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Cálculo del área mínima requerida por arrastre:

Paso 1: Fuerza mínima de arrastre requerida:

$$\begin{aligned} F &= \frac{M}{r} \\ &= \frac{0,36}{0,5} \\ &= 0,72 \text{ N} \end{aligned} \tag{42}$$

Paso 2: Fuerza de arrastre:

$$F = \frac{1}{2} C_d \rho A v^2 \tag{43}$$

Paso 3: Cálculo del área mínima requerida:

Despejando el área A , donde C_d es el coeficiente de arrastre para una forma geometrica de triangulo, 1,17 para este caso [84].

$$\begin{aligned} A &= \frac{2F}{C_d \rho v^2} \\ &= \frac{2 \times 0,72}{1,17 \times 1,225 \times 9^2} \\ &= \frac{1,44}{1,43325 \times 81} \\ &\approx 0,01240 \text{ m}^2 \\ A &\approx 0,01240 \text{ m}^2 \end{aligned} \tag{44}$$

Paso 4: Dimensiones aproximadas:

El área del triángulo se expresa como:

$$A = \frac{1}{2}LH \quad (45)$$

Con la proporción $L = 2H$:

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2}(2H)H \\ &= H^2 \\ H &= \sqrt{A} \\ &= \sqrt{0,01240} \\ &\approx 0,1113 \text{ m} \\ H &\approx \boxed{11 \text{ cm}} \end{aligned}$$

Longitud:

$$\begin{aligned} L &= 2H \\ &= 2 \times 0,11 \\ &\approx 0,22 \text{ m} \\ L &\approx \boxed{22 \text{ cm}} \end{aligned}$$

Dimensiones de la Velea:

Para una velocidad de viento de 9 m/s:

- Área mínima requerida: $\boxed{0,01240 \text{ m}^2}$ ($\approx 152 \text{ cm}^2$)
- Altura aproximada (**H**): $\boxed{11 \text{ cm}}$
- Longitud aproximada (**L**): $\boxed{22 \text{ cm}}$

Con las dimensiones antes especificadas la veleta tendrá la capacidad de rotar el inductor venciendo el momento de inercia que el mismo opone, el diseño de la veleta en forma de boceto se presenta en la figura (50):

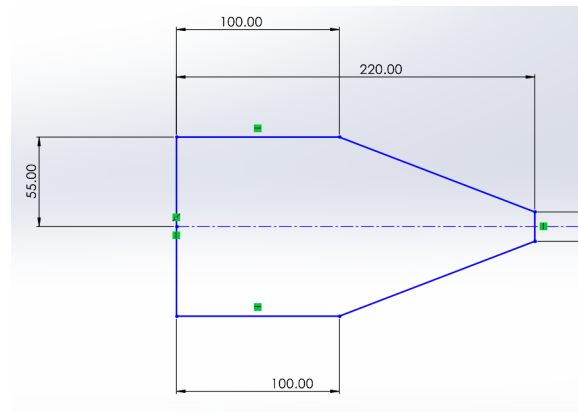


Figura 50: Dimensiones de Veleta.

El diseño de la propuesta teórica hace referencia a un triángulo que es la geometría que representa de manera más acercada al ala delta, aunque la geometría real es ligeramente distinta, el área requerida está presente. A continuación en la figura (51) se muestra el diseño final de la veleta en CAD 3D:

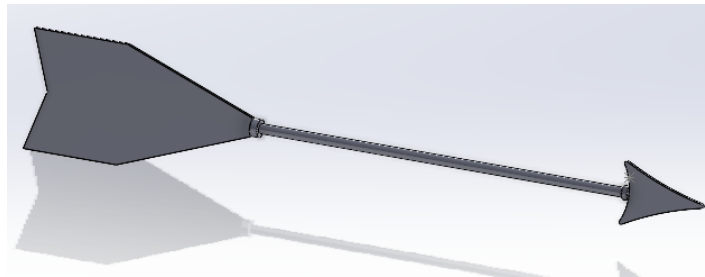


Figura 51: CAD Veleta.

La punta de lanza añadida al diseño cumple la función de indicar la dirección de donde viene el flujo de aire, dejando ver la predominancia de este y al mismo tiempo le proporciona un diseño estéticamente atractivo.

Las pruebas experimentales demostraron un correcto funcionamiento del ala delta, destacando su tiempo de reacción frente al flujo de aire y cambiado su posición en la dirección del mismo, ayudando así al inductor a permanecer en la posición ideal lo cual tendrá un impacto directo en el rendimiento del mismo (ver figura 52 y figura 53).



Figura 52: Veleta en Funcionamiento sin Inductor.



Figura 53: Veleta en Funcionamiento con Inductor.

Pruebas Experimentales.

Se realizan pruebas experimentales en túnel de viento para validar los resultados obtenidos en la simulación. Se miden variables clave como la velocidad de giro del rotor, el torque y potencia. La validez y confiabilidad de los instrumentos se confirma mediante la calibración del túnel de viento y la verificación de los modelos de simulación.

Calibración de Sección de Pruebas.

La sección de pruebas, donde se desarrolla la parte experimental de este proyecto tiene un area de salida de 60 x 60 cm y una longitud de 5 metros, está integrada por un ventilador trifásico que es accionado por energía eléctrica proveniente de la red pública a 220 V 3 líneas, a fin de poder hacer una regulación de la velocidad de giro del mismo es necesario utilizar un dispositivo denominado variador de frecuencia el cual cumple la función de limitar la frecuencia del motor y esto se ve directamente reflejado en su velocidad de rotación, de modo que es importante hacer una calibración de la velocidad de viento a la salida de la sección de pruebas y la frecuencia del dispositivo. Para lograr esto se hará uso de un dispositivo denominado anemómetro que mide la velocidad de flujo de aire, este nos indicara la dimensión de la velocidad en salida conforme vamos aumentando la frecuencia del ventilador, las muestras de velocidad se tomaran en 9 puntos distintos en el área de salida y se promedian hasta obtener la velocidad deseada.

En la figura (54) se muestra el dispositivo usado para realizar la medición en la sección de pruebas:



Figura 54: Anemómetro.

Los puntos seleccionados para hacer la medición de flujo fueron los siguientes mostrados en la figura (55), es importante mencionar que la lectura se hacía posicionando la parte frontal del dispositivo frente al flujo de aire, permitiendo que el mismo captara correctamente la corriente:

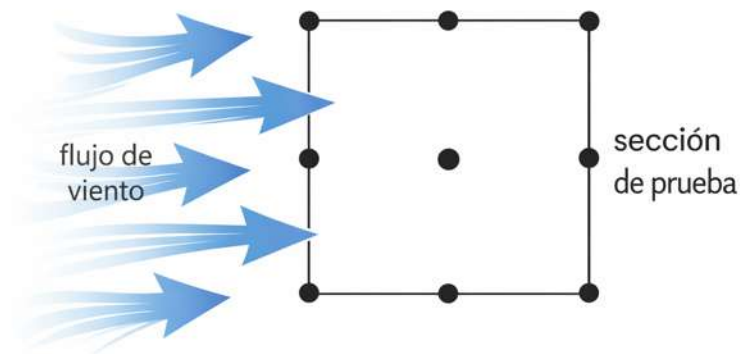


Figura 55: Puntos de Muestro de Velocidad de Aire.

Los resultados obtenidos de este muestro se muestra a continuación y nos permiten identificar el valor correspondiente de frecuencia para las diferentes velocidades de viento:

Tabla 24: Relación entre frecuencia y velocidad del viento.

Frecuencia (Hz)	Figura 56: Velocidad de Viento (m/s)
3.8148	1
6.579	2
9.9348	3
13.2906	4
16.47	5
19.992	6
22.9806	7
26.163	8
29.274	9
32.3442	10
35.7204	11
38.5968	12

Los valores obtenidos tendrán vital importancia a lo largo de las pruebas experimentales, permitirán tener un buen control del recurso eólico que se necesite. Esta calibración fue realizada en varias ocasiones a fin de lograr valores estables y eliminar el margen de error al mínimo.

Selección de Carga Eléctrica para el Generador.

Esta sección describe la selección de carga eléctrica para el generador que será utilizado en las presentes pruebas, el cual es de manufactura china y eso hizo complejo obtener una curva de operación, los datos proporcionados por el fabricante son los indicados en la tabla (26).

Tabla 25: Datos del generador

Datos del Generador	
Material	Metal
Imanes Permanentes	
Peso	0.3 kg
Rango de Voltaje	0 a 24 V
Rango de Amperaje	0 a 1500 mA
Potencia Máxima	20 W

Los datos proporcionados no indican una curva de comportamiento que permita identificar las RPM ideales de operación, ni la carga necesaria para alcanzar el mejor desempeño. A fin de encontrar este valor se hizo girar el rotor Savonius sin inductor a la velocidad de viento de diseño que es de 9 m/s se conectó a la salida del generador una carga eléctrica variable desde 0 a 5 ohms el cual es un rango común para generadores de baja potencia, midiendo los valores de potencia mecánica (obtenidos por medio del dinamómetro) con aumentos en la resistencia de 0.5 en 0.5 hasta identificar el valor de mayor desempeño, los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 26: Relación entre Carga Eléctrica y Potencia a una Velocidad de Viento 9 m/s.

Carga (Ohms)	Potencia Mecánica (W)
1	1.42
1.5	1.52
2	1.35
2.5	1.29
3	1.13
3.5	1.08
4	1.02
4.5	0.98
5	0.94

Los valores obtenidos identifican un valor máximo a 1.5 ohms lo cual corresponde a una potencia de 1.52 watts en la configuración sin inductor, esta misma prueba se realizó para las velocidades de viento de 7 y 8 m/s obteniendo resultados similares que rondan en valores de resistencia de 1.5 ohms. Aun cuando el generador tiene la capacidad de generar hasta 20 watts según el fabricante este valor no se alcanza debido a las altas RPM necesarias para alcanzar ese valor, por ejemplo para la velocidad de viento de 9 m/s el rotor estaría girando aproximadamente a 700 RPM en la configuración sin inductor y 780 RPM en la configuración con inductor.

Pruebas de Rotor Savonius sin Inductor.

Esta sección describe el proceso experimental que implico realizar las pruebas para el rotor Savonius, primeramente sin el elemento inductor, esto se realizó de esta manera con la intención de obtener la potencia mecánica, torque y velocidades de rotación desarrollada, para después incorporar el inductor y hacer una comparativa realista de las mejoras en el desempeño. Las pruebas se realizaron usando un dinamómetro que tiene la capacidad de medir niveles de torque muy bajos (inferiores a los 5 N*m), dicho dispositivo tiene un doble eje, es decir una entrada y una salida de una dimensión de 3/4 de pulgada en las cuales se acoplan el eje de rotor y el eje del generador respectivamente, dicho dispositivo se alimenta a 24 volts de corriente directa para poder funcionar. En la figura (56) se muestra el dispositivo y sus datos técnicos de forma detallada:

partnumber	DYN-200	repeatability	0.03%FS
rated capacity	±10000Nm	operating temperature range	-10 ~ + 50°C
power input	DC24V±15%	temperature effect of zero point	0.01%FS/°C
consumption current	150mA以下	temperature effect of output	0.01%FS/°C
output signals	±5VDC; ±10V/4-20mA	the maximum rotation speed	8000rpm
load resistance	2kΩabove	weight (the main part)	about 2.25kg
reactivity	1kHz	Torsion constant	3.85x10Nm/rad
pulse output	Four-pulse collector with one rotating output Open circuit output rating DC30V 10mA	the maximum twist angle	2.60x10rad(0.149°)
signal delay	0.6ms (50% reaction)	Inertial moment	0.38kgcm
safe overload	500%FS	axis	1.27mm
nonlinearity	0.03%FS	Natural Frequency of Bending Vibration (Rotation of the Subpart)	19.4Hz
lagging	0.03%FS		



Figura 56: Datos Técnicos Dinamómetro

Las pruebas experimentales sin inductor requirieron la instalación del rotor sobre el área de salida del túnel de viento, realizando un buen alineamiento y sujeción de las partes implicadas (rotor, dinamómetro y generador) en la figura (57) se muestra la instalación realizada para este análisis:



Figura 57: Montaje de Pruebas Experimentales sin Inductor.

Resulta importante identificar el valor de velocidad de viento necesaria para iniciar la rotación de la turbina Savonius cuando esta se encuentra libre de cargas en su eje, ante esto se han hecho una serie de pruebas de arranque del mismo, liberándolo de la influencia del generador y del elemento dinámometro.

A continuación se muestran los valores promedio obtenidos en una serie de 20 pruebas, reduciendo al mínimo los errores debidos a variaciones (ver tabla 28).

Tabla 27: Resultados de Pruebas Experimentales sin Inductor y sin Carga.

Arranque de Rotor Sin Inductor y Sin Carga			
Velocidad de Viento	Velocidad Angular (RPM)	TSR	Velocidad Angular (Rad/s)
0.5	-	-	-
1	-	-	-
1.5	-	-	-
2	-	-	-
2.5	-	-	-
3.2	310	0.86230375	32.4632
3.5	348	0.8850336	36.44256
4	429	0.9546537	44.92488

Se obtiene un valor de 3.2 m/s en la velocidad de viento, a 310 RPM y un correspondiente TSR de 0.86, para el arranque del rotor Savonius sin inductor y sin ningún tipo de carga en su eje.

Una vez que se obtuvo el valor del arranque sin carga se realizan las pruebas en operación es decir con los elementos generador e instrumento de medición dinamómetro acoplados al eje. La carga correspondiente para estas pruebas es como se mencionó en la sección anterior de 1.5 ohms, conectada a la salida del generador. Los valores obtenidos a diferentes velocidades de viento se muestran en la tabla (29):

Tabla 28: Resultados de Pruebas Experimentales sin Inductor.

Frecuencia (Hz)	Velocidad (m/s)	Vel. Angular (RPM)	Vel. Angular (rad/s)	TSR λ	Potencia (W)	Torque (N·m)
3.8148	1	–	–	–	–	–
6.579	2	–	–	–	–	–
9.9348	3	–	–	–	–	–
13.2906	4	–	–	–	–	–
16.47	5	–	–	–	–	–
19.992	6	–	–	–	–	–
22.9806	7	310	32.46312409	0.394195078	0.4	0.012
26.163	8	560	58.64306287	0.623082543	1	0.018
29.274	9	715	74.87462491	0.707149235	1.52	0.0205
32.3442	10	960	100.5309649	0.854513202	2.7	0.026
35.7204	11	1150	120.4277184	0.930577824	3.7	0.031
38.5968	12	1300	136.1356817	0.964294412	4.8	0.035

Los valores obtenidos muestran aspectos interesantes, el primero de ellos es que el arranque del rotor Savonius comienza en una velocidad de viento de 7 m/s (en operación es decir que con el generador e instrumento de medición acoplado), eso es aproximadamente a 310 RPM y dicho valor corresponde a un TSR de 0.4. Otro aspecto importante es que para una velocidad de viento correspondiente a la de diseño se tiene un valor de 715 RPM a un TSR de 0.7071 lo cual corresponde de muy buena manera con los valores seleccionados para las pruebas CFD sin inductor, en esta configuración se obtiene de manera experimental de 1.52 watts respecto al valor de 1.66 watts obtenidos en las pruebas CFD segun el cuadro 21, esto representa un valor de diferencia 9.55 por ciento, lo cual es bastante bueno. La diferencia entre estos dos valores radica principalmente en que CFD no considera aspectos como la estructura de la sección de prueba, a diferencia de la realidad en CFD se establece un flujo constante y uniforme en salida de la sección, además de que la turbulencia es muy dependiente del modelo de turbulencia y la discretización establecida previamente. Algo similar sucede para el valor de torque el cual tiene un valor de 0.02246 para el análisis CFD y de 0.0205 para las pruebas experimentales eso representa una diferencia de 8.75 por ciento, lo cual sigue siendo bastante aceptable y confirma la validación de las pruebas CFD y experimentales para la configuración sin inductor.

A continuación se muestran las gráficas de coeficiente de potencia y momento (ver figura 58 y figura 59) obtenidas de las pruebas experimentales para el modelo sin inductor:

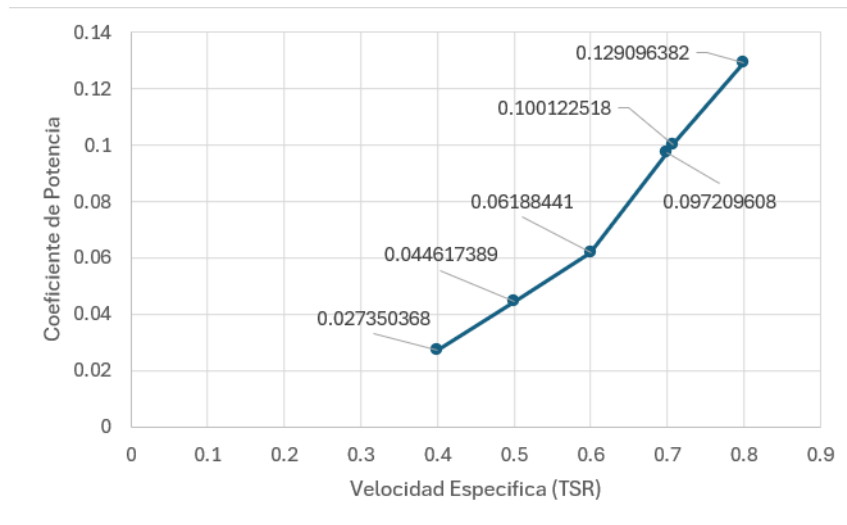


Figura 58: Velocidad Especifica vs Coeficiente de Potencia.

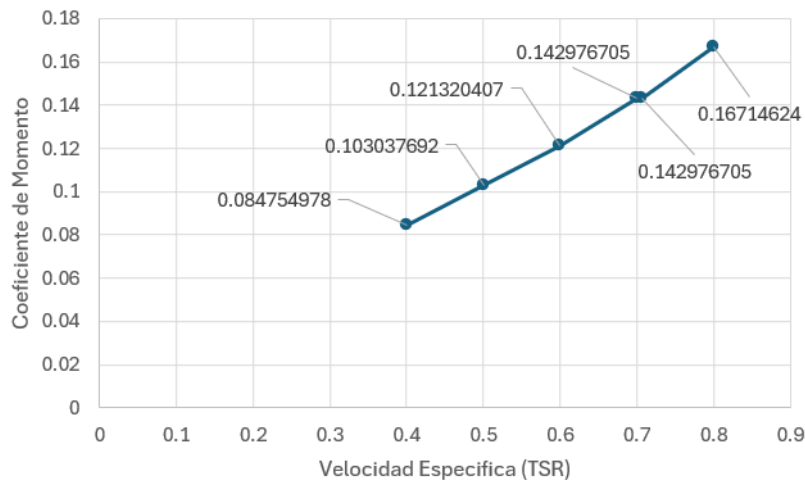


Figura 59: Velocidad Especifica vs Coeficiente de Momento.

Pruebas Experimentales de Rotor Savonius con Inductor.

Respecto al análisis experimental con el inductor incorporado, la configuración del montaje fue similar a la realizada para sin inductor. De igual manera que las pruebas anteriores resulta importante identificar el valor de velocidad de viento necesaria para iniciar la rotación de la turbina Savonius cuando esta se encuentra libre de cargas en su eje, ante esto se han hecho una serie de pruebas de arranque del mismo, liberandolo de la influencia del generador y del elemento dinámometro.

A continuación se muestran los valores promedio obtenidos en una serie de 20 pruebas, reduciendo al mínimo los errores debidos a variaciones (ver tabla 30).

Tabla 29: Resultados de Pruebas Experimentales con Inductor y sin Carga.

Arranque de Rotor Con Inductor y Sin Carga			
Velocidad de Viento	Velocidad Angular (RPM)	TSR	Velocidad Angular (Rad/s)
0.5	-	-	-
1	-	-	-
1.5	-	-	-
2	-	-	-
2.5	-	-	-
2.8	346	1.099934	36.23312
3	388	1.151221867	40.63136
3.5	464	1.1800448	48.59008

Se obtiene un valor de 2.8 m/s en la velocidad de viento a una velocidad de rotación de 346 RPM, correspondiente a un TSR de 1.09, para el arranque del rotor Savonius con inductor y sin ningún tipo de carga en su eje.

Una vez que se obtuvo el valor del arranque sin carga se realizan las pruebas en operación es decir con los elementos generador e instrumento de medición dinamómetro acoplados al eje. Estas pruebas se realizan con una carga en el generador de 1.5 ohms de la misma manera que se hizo en las pruebas sin inductor, la configuración de montaje se muestra a continuación.



Figura 60: Montaje de Pruebas Experimentales con Inductor.

Los resultados obtenidos para esta configuración se muestran a continuación:

Tabla 30: Resultados de pruebas experimentales con inductor

Frecuencia (Hz)	Velocidad (m/s)	Vel. Angular (RPM)	Vel. Angular (rad/s)	TSR λ	Potencia (W)	Torque (N·m)
3.8148	1	—	—	—	—	—
6.579	2	—	—	—	—	—
9.9348	3	—	—	—	—	—
13.2906	4	—	—	—	—	—
16.47	5	—	—	—	—	—
19.992	6	255	26.70353756	0.378300115	0.41	0.0154
22.9806	7	415	43.45869837	0.527712766	0.85	0.0195
26.163	8	575	60.21385919	0.639772254	1.42	0.023
29.274	9	780	81.68140899	0.771435529	2.01	0.027
32.3442	10	920	96.34217471	0.818908485	3.1	0.031
35.7204	11	1115	116.762527	0.90225589	4.4	0.037
38.5968	12	1250	130.8996939	0.927206165	5.7	0.041

Los valores obtenidos muestran aspectos interesantes, el primero de ellos es que el arranque del rotor Savonius comienza en una velocidad de viento de 6 m/s aproximadamente a 255 RPM y dicho valor corresponde a un TSR de 0.37 es decir existe un arranque más temprano que la configuración sin inductor la cual comienza a rotar a las 310 RPM a un TSR de 0.4

Respecto a la velocidad de diseño de 9 m/s se obtiene una velocidad de rotación de 780 RPM correspondientes a un TSR de 0.77, lo cual a su vez también representa una importante mejorar respecto a la configuración sin inductor que la cual indica un valor 715 RPM a un TSR de 0.7071 esto representa una mejora de 65 RPM en velocidad de rotación.

En cuanto a la potencia, podemos notar una mejorar significativa obteniendo un valor de 2.01 watts respecto a los 1.52 en la configuración sin inductor, esto representa una mejora significativa del 24.37 por ciento. Respecto al torque a la velocidad de diseño se tiene un valor de 0.027 N*m respecto a los 0.0205 N*m en la configuración sin inductor, lo cual representa una mejora de 24.07 por ciento.

Adicional a esto, haciendo una comparativa respecto a las simulaciones CFD en la configuración con inductor se tiene un valor de 2.22 según el cuadro 22, esto representa un margen de error de 10.63 por ciento, lo cual es bastante aceptable. Con estos parámetros podemos validar los resultados obtenidos en las en el análisis CFD mediante las pruebas experimentales y demostrando la mejorará en las prestaciones aerodinámicas y de rendimiento del rotor Savonius con inductor.

La tabla (32)(33) y las figuras (61)(62) muestran el valor de coeficiente de potencia y coeficiente de momento para diferentes velocidades específicas (TSR) de los datos obtenidos de las pruebas experimentales:

Tabla 31: Coeficientes de momento (C_m) y potencia (C_p) en función del TSR sin Inductor.

TSR	C_m	C_p
0.4	0.084754978	0.027350368
0.5	0.103037692	0.044617389
0.6	0.121320407	0.06188441
0.7	0.142976705	0.097209608
0.7071	0.142976705	0.100122518
0.8	0.16714624	0.129096382

Tabla 32: Coeficientes C_m y C_p en función del TSR con Inductor.

TSR	C_m	C_p
0.4	0.111591575	0.030958937
0.5	0.136002232	0.055989566
0.6	0.152043521	0.080361495
0.7	0.172966941	0.111320432
0.77	0.188310783	0.132398856
0.8	0.205049519	0.139455571

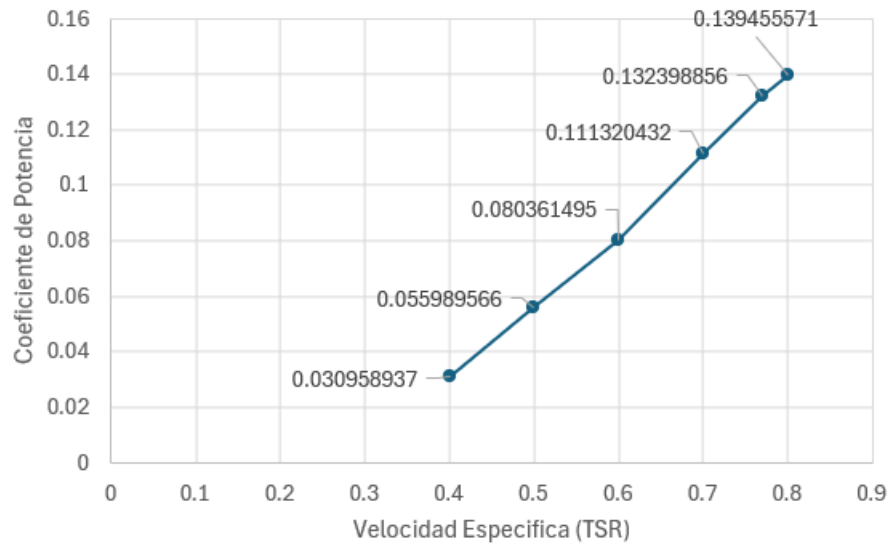


Figura 61: Velocidad Específica vs Coeficiente de Potencia.

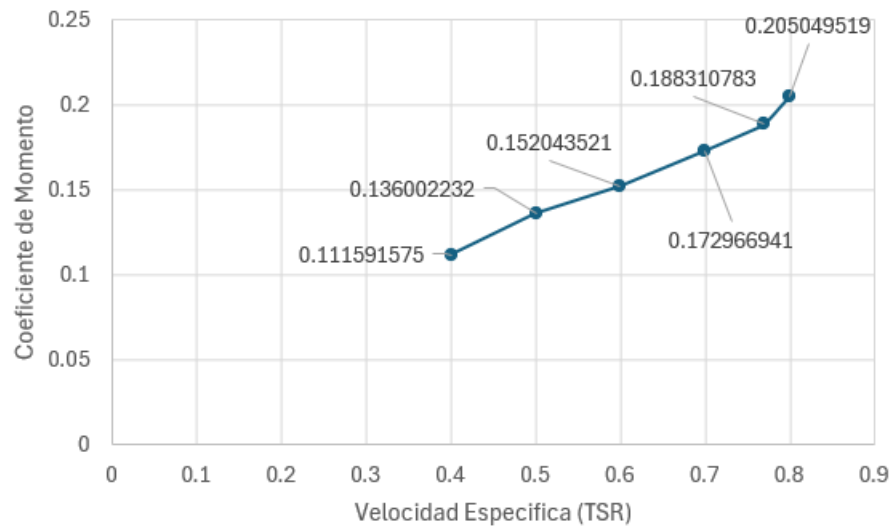


Figura 62: Velocidad Específica vs Coeficiente de Momento.

Discusión de Resultados:

Los resultados obtenidos para la parte de análisis computacional y la parte experimental confirman de una manera clara la mejora significativa que aporta la introducción de un inductor al rendimiento del rotor Savonius. Se confirma la validación del modelo CFD por medio de la experimentación, se obtuvo un valor de potencia para el caso del modelo CFD sin inductor de 1.66 watts respecto los 1.52 watts en lo experimental, habiendo un margen de error de 8.43 por ciento. Respecto a los resultados con inductor, se tiene un valor de 2.22 watts en el modelo CFD y 2.01 en la parte experimental, obteniendo un margen de error del 9.45 por ciento. Respecto al torque se obtuvo un valor de 0.022 N*m y 0.0205 N*m para la parte experimental con una diferencia porcentual de 6.81 por ciento, para los valores con inductor se obtuvo un valor de torque de 0.026 N*m en la simulación CFD mientras que en lo experimental un valor de 0.027 N*m lo cual representa una diferencia de 3.70 por ciento. Todas las pruebas experimentales se realizaron bajo la misma carga eléctrica en el generador, lo cual comprueba su homogeneidad. Estos resultados validan el modelo numérico CFD. En la tabla (34) y (35) se enlistan los valores obtenidos para las configuraciones con y sin inductor, haciendo una comparativa entre cada uno de ellos.

Resultados Análisis CFD		
Concepto	Sin Inductor	Con Inductor
A 9 m/s Velocidad de Diseño		
Velocidad de Rotación	715 RPM	780 RPM
TSR	0.7071	0.77
Mejora	8.33 %	
Potencia		
Mecánica	1.66 W	2.22 W
Mejora	25.11 %	
Torque		
Momento	0.022 N·m	0.026 N·m
Mejora	15.38 %	

Tabla 33: Resultados del análisis CFD de la turbina Savonius con y sin inductor

Resultados Pruebas Experimentales		
Concepto	Sin Inductor	Con Inductor
Arranque		
Velocidad de Viento	7 m/s	6 m/s
TSR	0.4	0.37
Velocidad de Rotación	310 RPM	255 RPM
Mejora	17.74 %	
A 9 m/s Velocidad de Diseño		
Velocidad de Rotación	715 RPM	780 RPM
TSR	0.7071	0.77
Mejora	8.33 %	
Potencia		
Mecánica	1.52 W	2.01 W
Mejora	24.37 %	
Torque		
Momento	0.0205 N·m	0.027 N·m
Mejora	24.07 %	

Tabla 34: Resultados experimentales de la turbina Savonius con y sin inductor

Los coeficientes de potencia para las simulaciones computacionales y las pruebas experimentales se muestra en la figura (63) y (64) para visualizar de manera gráfica la validación del modelo CFD:

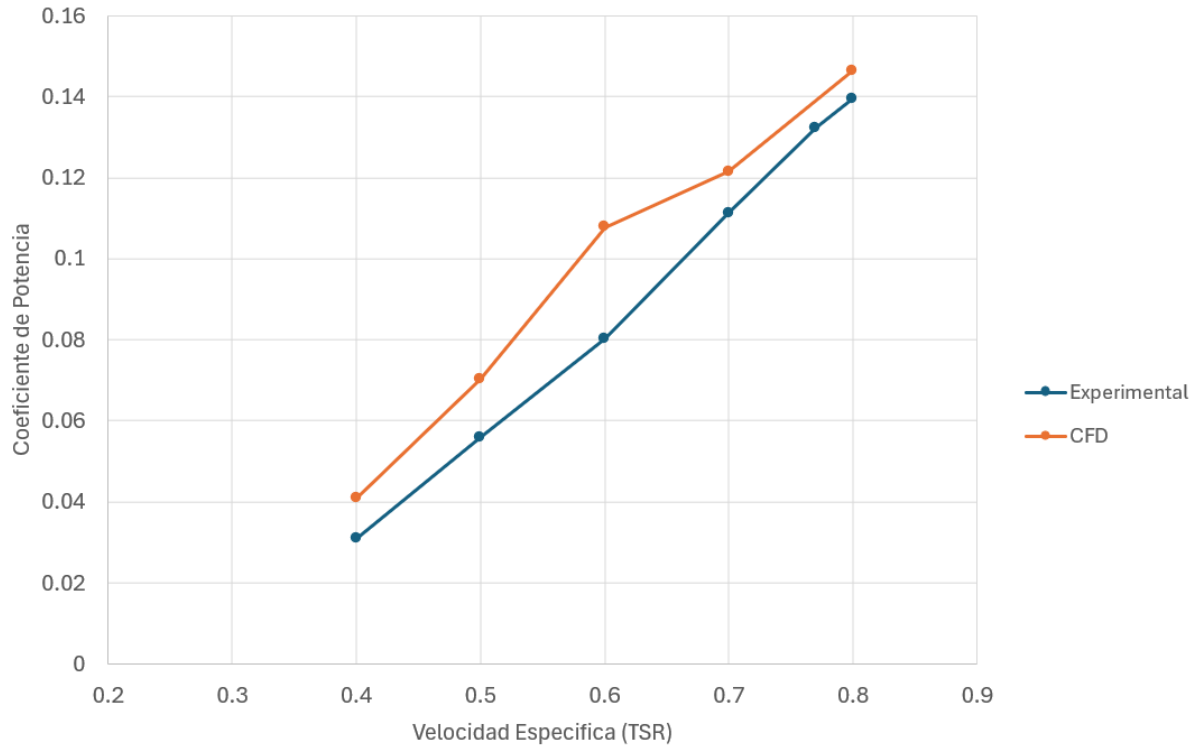


Figura 63: Comparativa Velocidad (TSR) Específica vs Coeficiente de Potencia.

Los coeficientes de potencia para las pruebas experimentales y las simulaciones CFD se muestra a continuación para visualizar de manera gráfica la mejora en el rendimiento del rotor helicoidal Savonius con inductor:

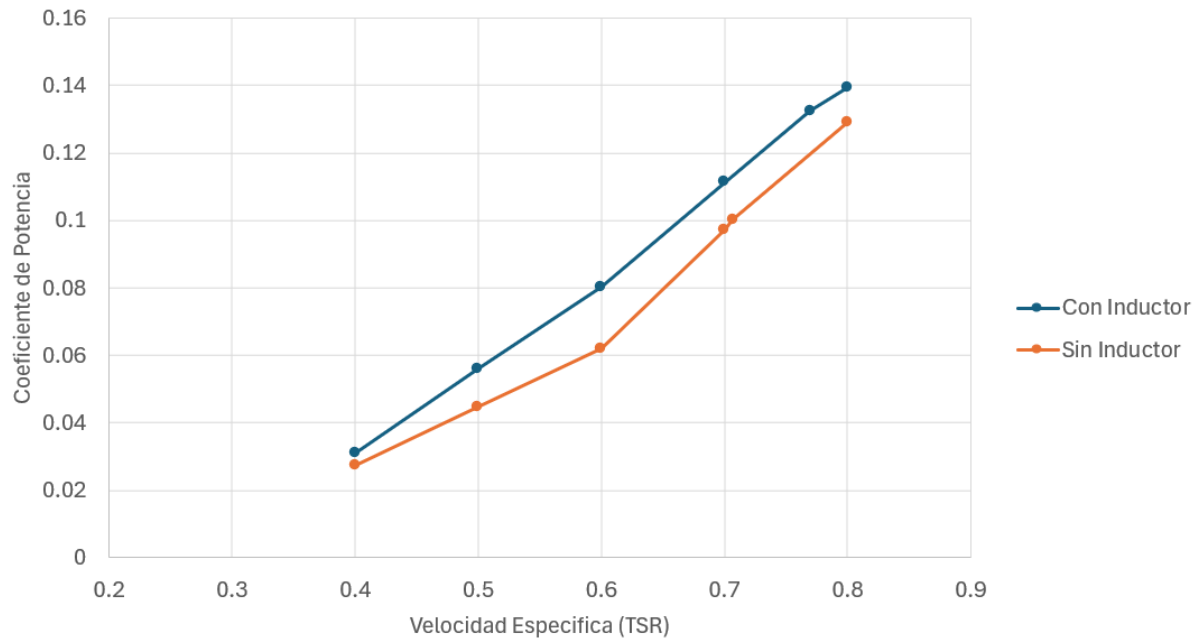


Figura 64: Comparativa Velocidad (TSR) Específica vs Coeficiente de Potencia Rotor Savonius con y sin Inductor.

Podemos visualizar una mejora en todos los valores de TSR alcanzando su punto máximo en un TSR de 0.8 a 780 RPM con una velocidad de viento de 9 m/s donde se produce un torque de 0.027 N*m y una potencia de 2.01 watts.

Conclusiones

Incorporar un inductor al rotor Savonius de dos palas helicoidales mejora significativamente su rendimiento aerodinámico al concentrar el flujo de aire en la pala cóncava y proteger la pala convexa de las fuerzas de arrastre que le restan aceleración, esto se traduce en un incremento neto del torque útil y, por ende, en una mejora directa de la eficiencia del sistema logrando con esto una mejora directa en su eficiencia tal como lo demostraron las simulaciones computacionales y las pruebas experimentales.

El coeficiente de potencia mejoró significativamente al incorporar el elemento inductor al rotor Savonius, aumentando hasta en un 24.37 por ciento, pasando de un valor de un C_p de 0.1001 en el rotor convencional a 0.13239 con el elemento inductor. Respecto al coeficiente de momento, la mejora fue del 24.07 por ciento, pasando de un valor de C_m de 0.1429 a 0.1883, tal como lo demostraron las pruebas experimentales, las cuales fueron realizadas con carga y acoplados al generador de energía eléctrica así como los instrumentos de medición.

Proteger la pala convexa del flujo de aire y concentrarlo en la pala cóncava tiene una gran importancia en la mejora aerodinámica de los vectores de velocidad y la manera como estos fluyen a través del rotor Savonius como lo demostraron los gráficos contornos de presión y velocidad.

El modelo CFD fue validado por medio de las pruebas experimentales con un porcentaje de error que rondan entre 8 y 10 por ciento, de acuerdo con los monitores de C_p y C_m obtenidos.

Incorporar la veleta de ala delta permitió al inductor alinearse y concentrar el flujo en la dirección predominante, permitiendo al rotor estar siempre expuesto a la corriente de aire.

Impacto Científico

El desarrollo de energías alternas es un tema que demanda atención, el presente modelo de turbina eólica de baja potencia busca contribuir en la transición a un país sustentable. Según el sitio web "Dimensions AI" en el mundo existen 5720 artículos y 5066 patentes de diseño enfocadas en turbinas eólicas del tipo Savonius y los datos para el año 2023 se aproximan a 761 artículos, lo cual representa un aumento significativo en la investigación de esta área respecto a los años anteriores donde la cifras fueron en todos los casos inferiores [8]. La mayoría de estas investigaciones fueron enfocadas en mejorar la potencia de las turbinas. La UMSNH está comprometida con el desarrollo de este tipo de tecnologías que permitan reducir los efectos contaminantes, en particular el posgrado de la facultad de ingeniería mecánica tiene como prioridad el uso eficiente y limpio de las diversas formas de energía; diseñando, analizando o manufacturando equipos con el objetivo de mejorar la calidad de vida de la sociedad [9]. Al diseñar una turbina eólica y mejorar su eficiencia por medio del uso de un inductor se busca fijar un precedente en la generación de energía eólica a pequeña escala.

Impacto Social

Según el enfoque del plan de desarrollo nacional es una prioridad que se impulse el desarrollo sostenible incorporando a las poblaciones y comunidades del país en la producción de energía por medio de fuentes renovables, teniendo como prioridad aquellas zonas de difícil acceso donde la energía eléctrica aún es limitada o nula [10]. Además, el plan de desarrollo estatal busca la preservación de los bosques y zonas protegidas, así como la explotación razonable de los recursos naturales, considerando que el cambio climático es una realidad que se percibe a nivel mundial [11]. En este sentido el objetivo de desarrollar una turbina eólica de baja potencia como alternativa en la generación de energía está alineado con la meta del plan de desarrollo estatal y federal, lograr la generación de energía por medio de una fuente inagotable como es el aire en cualquier zona o región del país, logrando contribuir a su desarrollo y comunicación, lo cual sería un paso importante para alcanzar el siguiente nivel en la producción de energía eléctrica mediante fuentes renovables y la preservación del medio ambiente.

Aportación a la Solución de Problemas Prioritarios

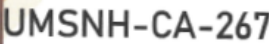
El Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático tiene como principal objetivo el desarrollar planes y tecnología que impacten directamente en la transición hacia un país que dependa de energías limpias. El Pronace-ECC promueve una transición energética justa y sustentable basada en un cambio profundo en los patrones de consumo, la democratización de la energía y en impulsar procesos productivos locales mediante la generación distribuida de la energía y el uso de fuentes renovables [12].

El presente proyecto contribuye significativamente con los objetivos del mencionado programa nacional en el proceso de investigación de generación de energía por medio de fuentes renovables que además sean de fácil acceso en sentido económico.

Acciones de Difusión

Las acciones de difusión definidas para lograr un mayor alcance entre la comunidad científica y la sociedad en general consiste en la exposición de los resultados obtenidos en una ponencia de carácter científico, asegurando así el acceso universal al conocimiento científico y tecnológico. Adicional a esto se redactará un artículo del proceso de diseño, manufactura, datos obtenidos de las pruebas de simulación y laboratorio del modelo propuesto, así como las conclusiones de la hipótesis establecida.

Se muestran a continuación algunas de las actividades desarrolladas a manera de difusión científica en el desarrollo del presente proyecto:



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

OTORGA LA PRESENTE



CONSTANCIA A:

**GONZALO PATIÑO RENTERIA
VÍCTOR LÓPEZ GARZA
CARLOS ALBERTO MAGAÑA ARANA
YUL RENÉ VARGAS CIRA
MARCO ANTONIO ESPINOSA MEDINA**

Por su destacable participación en el trabajo presentado que han intitulado:
“Dinámica de fluidos computacional en el diseño de turbinas eólicas” expuesto en
el 3er Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica Aplicada, el
cual fue llevado a cabo los días 11, 12 y 13 de noviembre de 2024.




Dr. Miguel Villagómez Galindo
Coordinador General CIIMMA


M.A. Roberto Cadenas Tovar
Director de la Facultad de Ingeniería Mecánica

Constancia de Participación Cartel Científico CIIMMA 2024.








LA UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO A
TRAVÉS DE LA COORDINACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA

Otorgan la presente

CONSTANCIA

A: Gonzalo Patiño Renteria

Por su valiosa participación como Colaborador con la actividad **"EL VIENTO, NUESTRO AMIGO INVISIBLE."**, en la **33ª edición del Tianguis de la Ciencia**, evento que se llevó a cabo de manera presencial los días **6 y 7 de junio de 2025** en las instalaciones de Ciudad Universitaria.
Con una duración de 16 horas.



Dr. Antoni
Secretario
UMSNH





Dr. Jaime Espino Valencia
Coordinador de la Investigación
Científica UMSNH

Constancia de Participación Tianguis de la Ciencia 2025.



EL GOBIERNO DEL ESTADO DE MICHOACÁN
A TRAVÉS DEL
INSTITUTO DE CIENCIA TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN,
OTORGA LA PRESENTE:

CONSTANCIA

GONZALO PATIÑO-RENTERIA; VÍCTOR LÓPEZ GARZA, MARCO ANTONIO ESPINOSA
MEDINA, GILBERTO GONZÁLEZ AVALOS, YUL RENÉ VARGAS CIRA

A:

POR LA EXPOSICIÓN DE SU PONENCIA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL EN EL ANÁLISIS
DE UNA MICROTURBINA EÓLICA SAVONIUS DE EJE VERTICAL EN EL EJE 1. INVESTIGACIÓN EN LAS
CIENCIAS BÁSICAS DE LA MESA 2: CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

PROYECTO DESARROLLADO EN: UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO (UMSNH)

EN EL MARCO DE LAS ACTIVIDADES ACADÉMICAS DEL



CONGRESO
ESTATAL de
CIENCIA,
TECNOLOGÍA
E INNOVACIÓN



DRA. ALEJANDRA OCHOA ZARZOSA
DIRECTORA GENERAL DEL INSTITUTO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA
E INNOVACIÓN DEL ESTADO DE MICHOACÁN
Morelia, Michoacán a 10 de octubre de 2025

DATOS DEL FIRMANTE

RFC: OOA720610S70

Nombre: ALEJANDRA OCHOA ZARZOSA

No. Certificado: 00001000000512647018

CN:AUTORIDAD CERTIFICADORA

Folio: 85f3e5de-a67c-52ff-b76c-e7c8b4dccc0ad

Correo electrónico: aleocho@hotmail.com



FIRMA ELECTRÓNICA AVANZADA

Cwb5hoDF1Fa3sM9aMIBIW8AJB+LjYmv6gviS186Aj7BHXQbu4sqEPGHIX6FuXYyt6AzuUoDvcip7G7GPBY28pdcS
sQ2Q0UKME04Nnu3Xv66x3lu7oMdWwYUX1TMWpoaT4uqO5JpBXPI40U/V8fEiOOxrw9/hVFNRn3oyQr9omWvrT
x6lfk894PdL/hp2KlIEix3D4ZbV8w8hJnVdmjH4fjOd/MYGJIT70TMrkTZVwhFzL9MvzZeBPwoBSEII/96dyVjxzR5E08jd
5owxUBI2+FozgR1Lqy7rPyzjzNu8518/ophDy37lIPuwr6j10rErCYulr2k4/bA==

El presente documento electrónico ha sido firmado mediante el uso de la firma electrónica avanzada del funcionario competente, amparada por un certificado digital vigente a la fecha del presente, de conformidad con los artículos 18 de la Ley de Gobierno Digital del Estado de Michoacán de Ocampo; 38 fracción IX y 39 fracción XII del Reglamento Interior de la Secretaría de Finanzas y Administración; 2º, 8º y 9º de la Ley de Firma Electrónica Avanzada; 1º y 2º fracción I, 4º, 5º, 6º, 14 fracción I, 15 fracciones I, II, III, IV, 22, 25, 26, 33 fracción II, 34, 37 y 38 de la Ley de Firma Electrónica Certificada del Estado de Michoacán de Ocampo; 1º, 4º, 11 y 18 del Reglamento de la Ley de Firma Electrónica Certificada del Estado de Michoacán de Ocampo; todas y cada una de las legislaciones vigentes hasta la fecha. El formato PDF tiene una cantidad de 4 páginas incluyendo foto y se firma con fecha 03-11-2025, a las 13:55:11 hrs.

El presente documento electrónico ha sido firmado mediante el uso de la firma electrónica avanzada por el servidor público competente, amparada por un certificado digital vigente a la fecha de su elaboración, y es válido de conformidad con lo dispuesto en los Artículos 7º y 8º fracción I de la Ley de Firma Electrónica Avanzada y Artículo 12 de su Reglamento. El presente documento electrónico, su integridad y autenticidad, se podrá comprobar en <https://habeerelectronico.michoacan.gob.mx/documento?n=RPFRuCKVwCP2wYmngdzpynghM4T3pu7058>.

Constancia de Participación Ponencia Oral; Congreso Estatal Michoacán 2025.



Ponencia Oral; Aniversario FIM UMSNH 2025.

Bibliografía

- [1.] Hau, E. (2013). Wind turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics. Springer Science y Business Media.
- [2.] Mohamed, M., Janiga, G., Pap, E., y Thévenin, D. (2010). Optimization of Savonius turbines using an obstacle shielding the returning blade. Renewable Energy.
- [3.] M. Hadi Ali. (2013). Experimental Comparison Study for Savonius Wind Turbine of Two, Three Blades at Low Wind Speed. International Journal of Modern Engineering.
- [4.] Frederikus Wenehenubun, Andy Saputra, Hadi Sutanto. (2015). An Experimental Study on the Performance of Savonius Wind Turbines Related With The Number Of Blades. Energy Procedia.
- [5.] N.H. Mahmoud, A.A. El-Haroun, E. Wahba, M.H. Nasef. (2012) An experimental study on improvement of Savonius rotor performance. Alexandria Engineering Journal.
- [6.] Takenori OGAWA, Haruo YOSHIDA. (1986) The Effects of a Deflecting Plate and Rotor End Plates on Performances of Savonius-type Wind Turbine. Bulletin of JSME.
- [7.] Burçin Deda Altan, Mehmet Atılğan. (2010) The use of a curtain design to increase the

performance level of a Savonius wind rotors. *Renewable Energy*.

[8.] <https://www.dimensions.ai/>

[9.] <https://www.prensa.umich.mx/?p=16406>

[10.] Gobierno de México. (2019). Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024.

[11.] Gobierno del Estado de Michoacán. (2021). Plan de Desarrollo Integral del Estado de Michoacán 2021-2027.

[12.] CONAHCYT. Problemática de energía y cambio climático.

[13] Asociación Española de Normalización. (Año). UNE-EN 61400-2: Aerogeneradores. Parte 2: Aerogeneradores de pequeña potencia. Madrid: AENOR.

[14] Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L. (2009). *Wind energy explained: Theory, design and application* (2nd ed.). Wiley.

[15] CENGEL, Yunus A. y John M, “Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones”, 1ª edición, McGraw-Hill, 2006. Tabla A-9.

[16] Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., Ljung, G. M. (2015). *Time series analysis: Forecasting and control* (5th ed.). Wiley.

[17] Foley, A. M., Leahy, P. G., Marvuglia, A., McKeogh, E. J. (2012). Current methods and advances in forecasting of wind power generation. *Renewable Energy*, 37(1), 1-8.

[18] Pankratz, A. (1991). *Forecasting with dynamic regression models*. Wiley.

[19] Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., Scott, G. (2009). Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development. National Renewable Energy Laboratory (NREL).

[20] Veers, P., Dykes, K., Lantz, E., Barth, S., Bottasso, C. L., Carlson, O., ... Wirth, H. (2019). Grand challenges in the science of wind energy. *Science*, 366(6464), eaau2027.

[21] IEC 61400-1. (2019). Wind energy generation systems – Part 1: Design requirements. International Electrotechnical Commission.

[22] Paraschivoiu, I. (2002). *Wind Turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept*. Polytechnic International Press.

[23] Ferreira, C. S., et al. (2009). Visualization by PIV of dynamic stall on a vertical axis wind turbine. *Experiments in Fluids*, 46(1), 97-108.

[24] Islam, M., et al. (2008). Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), 1087-1109.

[25] Knutson, R. C. (2009, July 30). Multi-axis wind turbine with power concentrator sail.

[26] Layeghmand, K. (2020). Improving efficiency of Savonius wind turbine by means of an airfoil-shaped deflector. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(589).

- [27] Rezaeiha, A., Micallef, D., Kalkman, I. (2020). Optimization and economic analysis of a wind turbine design for energy maximization. *Energy Conversion and Management*, 218, 113062.
- [28] Hameed, M. S., Ma, X., Wang, F. (2022). Experimental and numerical study of a novel Savonius turbine design with wavy blades. *Energy Reports*, 8, 15249-15261.
- [29] Stampa, U. (1980). Wind turbine with twisted blades (Patente No. DE2948060A1). Oficina Alemana de Patentes y Marcas.
- [30] ANSYS, Inc. (2023). ANSYS Fluent User's Guide (Versión 2023 R1). ANSYS, Inc. <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
- [31] Akwa, J. V., Vielmo, H. A., Petry, A. P. (2012). A review on the performance of Savonius wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3054-3064.
- [32] Roy, S., Saha, U. K. (2013). Review on the numerical investigations into the design and development of Savonius wind rotors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 73-83.
- [33] Eldridge, F. R. (1980). Wind machines (2nd ed.). Van Nostrand Reinhold.
- [34] Savonius, S. J. (1926). Wind turbine (Finnish Patent No. 10567).
- [35] Blackwell, B. F., Sheldahl, R. E., Feltz, L. V. (1977). Wind tunnel performance data for two- and three-bucket Savonius rotors (SAND-76-0131). Sandia Laboratories.
- [36] Modi, V. J., Fernando, M. S. U. K. (1989). On the performance of the Savonius wind turbine. *Journal of Solar Energy Engineering*, 111(1), 71-76.
- [37] Saha, U. K., Thotla, S., Maity, D. (2008). Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(8-9), 1359-1375.
- [38] Kamoji, M. A., Kedare, S. B., Prabhu, S. V. (2009). Performance tests on helical Savonius rotors. *Renewable Energy*, 34(3), 521-529.
- [39] Kamoji, M. A., Kedare, S. B., Prabhu, S. V. (2008). Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor. *Applied Energy*, 86(7-8), 1064-1073.
- [40] Altan, B. D., Atilgan, M. (2010). The use of a curtain design to increase the performance level of a Savonius wind rotor. *Renewable Energy*, 35(7), 1487-1492.
- [41] Gupta, R., Das, R., Sharma, K. K. (2006). Experimental study of a Savonius-Darrieus wind machine. In *Proceedings of the International Conference on Renewable Energy for Developing Countries*.
- [42] Jeon, K. S., Jeong, J. I., Pan, J. K., Ryu, K. W. (2015). Effects of end plates with various shapes and sizes on helical Savonius wind turbines. *Renewable Energy*, 79, 167-176.
- [43] Saha, U. K., Rajkumar, M. J. (2006). On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades. *Renewable Energy*, 31(11), 1776-1788.
- [44] Mohamed, M. H., Janiga, G., Pap, E., Thévenin, D. (2010). Optimization of Savonius turbines using an obstacle shielding the returning blade. *Renewable Energy*, 35(11), 2615-2623.

- [45] Tartuferi, M., D'Alessandro, V., Montelpare, S., Ricci, R. (2015). Enhancement of Savonius wind rotor aerodynamic performance: A computational study of new blade shapes and curtain systems. *Energy*, 79, 371–384.
- [46] Lajnef, M., Mosbahi, M., Abid, H., Driss, Z., Tucciarelli, T., Amato, E., Sinagra, M. (2024). Numerical investigation of helical Savonius wind rotor performance with a novel deflector design. In M. Chouchane, M. Abdennadher, N. Aifaoui, F. Chaari, S. Bouaziz, Z. Affi, M. Haddar, L. Romdhane, A. Benamara (Eds.), *Design and modeling of mechanical systems - VI* (pp. 198–211). Springer.
- <https://conahcyt.mx/pronaces/pronaces-energia-y-cambio-climatico/problematica-ecc/>
- [47] Betz, A. (1926). *Wind-energie und ihre ausnutzung durch windmühlen*. Vandenhoeck Ruprecht.
- [48] Salleh, M. B., Kamaruddin, N. M., Mohamed, M. A., Ismail, K. M. (2024). Enhancing the performance of Savonius wind turbines: A review of advances using multiple parameters. *Energies*, 17(15), 3708. <https://doi.org/10.3390/en17153708>
- [49] Ragheb, M., Ragheb, A. M. (2011). Wind turbines theory - The Betz equation and optimal rotor tip speed ratio. In R. Cariveau (Ed.), *Fundamental and advanced topics in wind power* (pp. 1–20). InTech.
- [50] Chan, C. M., Bai, H. L., He, D. Q. (2018). Blade shape optimization of the Savonius wind turbine using a genetic algorithm. *Applied Energy*, 213, 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.029>
- [51] Al-Ghriybah, M., Zulkaffi, M. F., Didane, D. H., Mohd, S. (2019). Performance of Savonius wind turbine with different shapes of blades and aspect ratios. *Energy Procedia*, 158, 4523–4528. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.737>
- [52] Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L. (2002). *Wind energy explained: Theory, design and application*. Wiley, 97.
- [53] Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L. (2002). *Wind energy explained: Theory, design and application*. Wiley. 118–120.
- [54] White, F. M. (2011). **Fluid mechanics* (7th ed.)*. McGraw-Hill.
- [55] Schlichting, H., Gersten, K. (2017). **Boundary-layer theory* (9th ed.)*. Springer.
- [56] McMaster, J. R., Henderson, M. L. (1973). **Low-speed wind tunnel tests on 27 airfoils for use on small wind turbines* (NASA CR-2123)*. NASA.
- [57] Lissaman, P. B. S. (1983). Low-Reynolds-number airfoils. **Annual Review of Fluid Mechanics*, 15*, 223–239. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.15.010183.001255>
- [58] Tjiu, W., Marnoto, T., Mat, S., Ruslan, M. H., Sopian, K. (2015). Darrieus vertical axis wind turbine for power generation: Technology review and design optimization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52*, 318–330. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.032>
- [59] Islam, M., Mekhilef, S., Saidur, R. (2013). Progress and recent trends of wind energy technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21*, 456–468. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.007>

[60] Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., Bossanyi, E. (2011). **Wind energy handbook** (2nd ed.). Wiley.

[61] Vermeer, L. J., Sørensen, J. N., Crespo, A. (2003). Wind turbine wake aerodynamics. **Progress in Aerospace Sciences*, 39*(6–7), 467–510.

[62] Comisión Federal de Electricidad. (2020). *Manual de Diseño de Obras Civiles*. Autor.

[63] Çengel, Y. A., Cimbala, J. M. (2006). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones* (1^a ed.). McGraw-Hill.

[64] Fujisawa, N. (1992). On the torque mechanism of Savonius rotors. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 40(3), 277–292. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(92\)90969-6](https://doi.org/10.1016/0167-6105(92)90969-6)

[65] Aboujaoude, H., Polidori, G., Beaumont, F., Murer, S., Toumi, Y., Bogard, F. (2023). Aerodynamic performance enhancement of an axisymmetric deflector applied to Savonius wind turbine using novel transient 3D CFD simulation techniques. *Energies*, 16(3), 909. <https://doi.org/10.3390/en16030909>

[66] Fatahian, E., Ismail, F., Ishak, M. H. H., Chang, W. S. (2022). An innovative deflector system for drag-type Savonius turbine using a rotating cylinder for performance improvement. *Energy Conversion and Management*, 257, 115453. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115453>

[67] Idrissi, M. S., Selmi, N., Chrigui, M. (2023). Efficiency improvement of Savonius wind turbine by mean of novel deflector system. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(7), 396. <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04330-7>

[68] Foley, A. M., Leahy, P. G., Marvuglia, A., McKeogh, E. J. (2012). Current methods and advances in forecasting of wind power generation. *Renewable Energy*, 37(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.09.019>

[69] Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., Ljung, G. M. (2015). *Time series analysis: Forecasting and control* (5th ed.). John Wiley Sons

[70] Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., Scott, G. (2009). Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development (NREL/TP-500-38060). National Renewable Energy Laboratory. <https://doi.org/10.2172/947422>

[71] Veers, P., Dykes, K., Lantz, E., Lund, H. A., Manwell, J., McMillan, A., ... Robertson, A. (2019). Grand challenges in the science of wind energy. *Science*, 366(6464), eaau2027. <https://doi.org/10.1126/science.aau2027>

[72] Wilcox, D. C. (2006). *Turbulence modeling for CFD* (3rd ed.). DCW Industries.

[73] Spalart, P. R., Allmaras, S. R. (1992). A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *AIAA Paper 92-0439*. <https://doi.org/10.2514/6.1992-439>

[74] Taguchi, G. (1987). *System of experimental design: Engineering methods to optimize quality and minimize cost* (Vol. 1–2). UNIPUB/Kraus International.

[75] Badshah, M., Ali, N., Jang, C.-M. (2019). CFD study of blockage ratio and boundary proximity effects on the performance of a tidal turbine. *IET Renewable Power Generation*, 13(6), 951–960. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5134>

- [76] Versteeg, H. K., Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method* (2nd ed.). Pearson. (Capítulo sobre convergencia numérica y monitoreo de residuales).
- [77] Ferrari, G., et al. (2021). "Mesh convergence analysis for vertical axis wind turbines using CFD". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 210, 104512.
- [78] Wood, D. (2011). *Small wind turbines: Analysis, design, and application*. Springer. p. 147.
- [79] Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., Bossanyi, E. (2011). *Wind energy handbook* (2.^a ed.). Wiley.
- [80] Casillas Farfán, C., Solorio Díaz, G., López Garza, V., Galván González, S., Figueroa, K. (2022). Novel induction blade design for horizontal axis wind turbines to improve starting phase: CFD and testing analysis. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 15(6), 1635–1648. <https://doi.org/10.47176/jafm.15.06.1163>
- [81] Carlos Alberto, M. A., Victor, L. G., Christian, C. F., Isaac, H. A., Miriam, V. P., Marco Antonio, E. M. (2025). Analysis of a new blade design for a vertical axis wind turbine called flow concentrator. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 18(10), 2488–2503. <https://doi.org/10.47176/jafm.18.10.2488>
- [82] Marín Téllez, G. J., López Garza, V., Solorio Díaz, G., Pacheco Ibarra, J. J. (2024). Análisis mediante dinámica de fluidos computacional del rotor de una turbina eólica de eje vertical híbrida H-Savonius. *Ciencia Nicolaita*, (90). <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.734>
- [83] National Aeronautics and Space Administration (NASA). (s.f.). Shape effects on drag. Glenn Research Center. Recuperado de <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/shape-effects-on-drag-2/>

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en ciencia en ingeniería mecánica	
Título del trabajo	Diseño de un Inductor para Turbina Eólica de Eje Vertical Tipo Savonius	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Gonzalo Patiño Renteria	1207668d@umich.mx
Director	Marco Antonio Espinosa Medina	marco.espinosa@umich.mx
Codirector	Víctor López Garza	victor.garza@umich.mx
Coordinador del programa	Pablo Genaro Martínez Torres	mae.cs.ingenieria.mecanica@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	sí	Uso para mejorar los términos y palabras dentro del texto, sin perder la idea original, con la intención de mejorar la comprensión del texto.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	sí	Términos traducidos del idioma inglés al español a fin de establecer una correcta comprensión para el lector.
Traducción a otra lengua	no	
Revisión y corrección de estilo	no	
Análisis de datos	sí	Interpretación de datos para llegar a conclusiones que permitan una mejor comprensión de las ideas descritas, mejorando la calidad del texto.
Búsqueda y organización de información	sí	Búsqueda de información científica que complemente o sustente lo descrito, con la intención de fortalecer la validez de las ideas establecidas.
Formateo de las referencias bibliográficas	sí	Uso de IA para crear el formato APA de las referencias, a fin de que sean compatibles con los textos científicos desarrollados internacionalmente.
Generación de contenido multimedia	sí	Refinamiento de imágenes previamente creadas, con la intención de mejorar su calidad o la definición de etiquetas clave para la comprensión del texto de forma visual.
Otro		

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Gonzalo Patiño Rentería 
Lugar y fecha	Morelia Michoacán México a 22 de abril del 2026

Gonzalo Patiño Rentería

Diseño de un Inductor para Turbina Eólica de Eje Vertical Tipo Savonius.pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:582768108

Fecha de entrega

24 abr 2026, 4:32 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

24 abr 2026, 4:37 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

Diseño de un Inductor para Turbina Eólica de Eje Vertical Tipo Savonius.pdf

Tamaño del archivo

10.2 MB

127 páginas

35.906 palabras

194.558 caracteres

10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 9%  Fuentes de Internet
- 5%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
90 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**
9 caracteres sospechosos en N.º de página
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.