



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Maestría

**Diseño de un aerogenerador de baja potencia para la
generación de energía eléctrica distribuida en entornos
urbanos**

presentada por

Ing. Daniel Juan José Ortiz Velázquez

como requisito para la obtención del grado de

**Maestro en Ciencias en Ingeniería
Mecánica**

Director de tesis

Dr. Erik Rosado Tamariz

Codirector de tesis

Dra. Luisana Claudio Pachecano

Cuernavaca, Morelos, México. Agosto de 2025.



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, 27/junio/2025

Oficio No. SAC/155/2025

Asunto: Autorización de impresión de tesis

DANIEL JUAN JOSÉ ORTIZ VELÁZQUEZ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"Diseño de un aerogenerador de baja potencia para la generación de energía eléctrica distribuida en entornos urbanos"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que estan de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

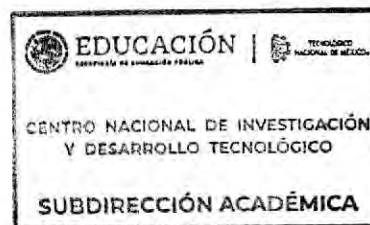
Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"Conocimiento y Tecnología al Servicio de México"

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



c.c.p. Departamento de Ingeniería Mecánica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Intermedio Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4104,
e-mail: acad_cenidet@tecnm.mx tecnm.mx | cenidet@tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Departamento de Ingeniería Mecánica

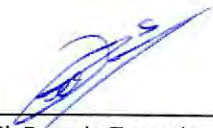
Cuernavaca, Mor., 24/junio/2025

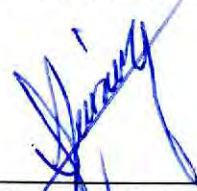
OFICIO No. DIM/120/2025

Asunto: Aceptación de documento de tesis
CENIDET-AC-004-M14-OFICIO

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del C. Daniel Juan José Ortiz Velázquez con número de control M23CE147, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado "Diseño de un aerogenerador de baja potencia para la generación de energía eléctrica distribuida en entornos urbanos" y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.


Dr. Erik Rosado Tamariz
Director de tesis


Dra. Luisana Claudio Pachecano
Director de tesis


Dr. Andrés Blanco Ortega
Revisor 1


Dra. Claudia Cortés García
Revisor 2


Dra. Sara Lilia Moya
Acosta
Revisor 3

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.
Expediente / Estudiante

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 2108,
e-mail: dir_cenidet@tecnm.mx | tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx



2025
Año de
La Mujer
Indígena

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico



Dedicatoria

A mi madre y padre, Salustia y Prospero, por ser mi guía, mi ejemplo y mi mayor fortaleza. Gracias por su amor incondicional, por cada sacrificio silencioso y por enseñarme a luchar por mis sueños con humildad y determinación.

A mi hermano Emmanuel y a mi tío José, por su compañía, su apoyo inquebrantable y por estar siempre ahí, celebrando cada logro y levantándose en los momentos difíciles. Su presencia ha sido un pilar invaluable en este camino.

Con especial cariño y gratitud, dedico este esfuerzo a la memoria de mi abuelo, Sidronio, quien más que un abuelo, fue siempre como un padre para mí. Su ejemplo, sus enseñanzas y su amor siguen presentes en cada paso que doy. Este logro lleva su nombre y legado. Te mando un abrazo lleno de amor y agradecimiento hasta el cielo papá Sidri. Sé que, dondequiera que estés, te sientes orgulloso de mí.

Agradecimientos

Agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo brindado a través de la beca otorgada durante el desarrollo de mis estudios de maestría. Su respaldo fue fundamental para poder concentrarme plenamente en mi formación académica y profesional.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) y al Tecnológico Nacional de México (TecNM), por haber sido el espacio que me permitió crecer, aprender y consolidar mi vocación.

A mi familia, especialmente a mis padres, mi hermano y mis tíos, gracias por su amor incondicional, por su apoyo firme en los momentos más inciertos, y por ser mi fuerza constante. Su confianza en mí ha sido el motor que me ha impulsado a seguir adelante. Este logro no solo es mío, también es de ustedes.

Con especial cariño y agradecimiento, a mi papá Sidronio, por sus enseñanzas, por su ejemplo y por ese amor que siempre ha estado presente en mi vida, incluso en los momentos en los que las palabras no bastaban. Cada logro mío lleva su huella.

A mis asesores, Dr. Erik Rosado Tamariz, Dr. Rafael Campos Amezcua y Dra. Luisana Claudio Pachecano, mi más sincero agradecimiento por su guía constante, sus observaciones críticas y por exigirme siempre alcanzar un nivel más alto. Gracias también por la calidez humana, la cercanía y la amistad sincera que me ofrecieron durante todo este proceso. Su acompañamiento fue clave para el desarrollo de este trabajo y para mi crecimiento profesional y personal.

A mis revisores, Dra. Claudia Cortés García, Dr. Andrés Blanco Ortega y Dra. Sara Lilia Moya Acosta, por su tiempo, atención, aportaciones y el compromiso que dedicaron a la revisión de este trabajo. Sus valiosos comentarios contribuyeron significativamente a enriquecer y fortalecer este trabajo.

Agradezco sinceramente al Ing. Eduardo Velasco y a mis docentes por su guía, compromiso y exigencia formativa, al personal administrativo por su atención y disposición, y a los compañeros y amigos que encontré en este camino, por cada palabra de aliento, cada experiencia compartida y por todos esos momentos que enriquecieron esta etapa de mi vida, tanto en lo académico como en lo personal.

Gracias a todos los que, de una u otra forma, contribuyeron a que esta meta fuera posible. Este logro es el reflejo de muchas manos, palabras, ideas y corazones que me acompañaron.

Tabla de Contenido

Resumen	1
Abstract	2
1 Introducción	3
2 Estado del Arte.....	4
2.1. Aerogeneradores en entornos urbanos	4
2.2. Introducción de los Aerogeneradores en Espiral de Arquímedes (ASWT).....	10
2.3. Comparativa de los aerogeneradores tipo ASWT respecto a otros tipos de aerogeneradores	12
2.4. Parámetros y variables en el diseño de aerogeneradores tipo ASWT	14
2.5. Conclusiones del estado del arte	21
2.6. Definición del problema	23
2.7. Hipótesis	23
2.8. Objetivo General.....	23
2.8.1 Objetivos específicos.....	23
2.9. Justificación del problema	24
2.10. Alcances y limitaciones.....	24
3 Marco Teórico	25
3.1. Energía eólica	25
3.2. Aerogeneradores	26
3.2.1 Funcionamiento de un aerogenerador.....	26
3.2.2 Clasificación de los aerogeneradores	27
3.2.3 Teoría de momento unidimensional y límite de Betz.....	29
3.2.4 Aerogeneradores en espiral	33
3.2.5 Aerogeneradores en Espiral de Arquímedes (ASWT)	34
3.3. Capa límite	36
3.3.1 Capa Límite Atmosférica.....	37
3.3.2 Capa Límite Urbana.....	37
4 Plan de Trabajo.....	39
4.1. Metodología	39

5	Caracterización del viento en un entorno urbano	42
5.1.	Equipo de medición y características de la muestra	42
5.2.	Análisis estadístico de los datos.....	46
6	Definición de los parámetros de diseño	57
7	Selección del tipo de aerogenerador ASWT.....	67
8	Propuesta de diseño del aerogenerador ASWT.....	73
9	Análisis y verificación del rendimiento del diseño propuesto	75
9.1.	Elaboración del prototipo y pruebas experimentales	75
9.1.1	Elaboración de los prototipos	76
9.1.2	Prueba experimental en campo abierto.....	78
9.1.3	Prueba experimental en túnel de viento.....	81
9.2.	Verificación numérica de un caso de estudio reportado en la literatura	84
9.2.1	Análisis de sensibilidad de malla CFD.....	87
9.2.2	Condiciones de frontera.....	90
9.2.3	Análisis de resultados	92
9.3.	Estudio numérico de modelo propuesto.....	98
9.4.	Evaluación estructural mediante el Método de Elementos Finitos.....	105
10	Producción de Energía Anual.....	123
11	Conclusiones	129
11.1.	Trabajos futuros y recomendaciones.....	130
12	Referencias.....	133
	Apéndice A.....	141
	Anexos	141

Lista de Figuras

Figura 2.1 Variación de la velocidad del viento debido a la rugosidad de superficie y a la turbulencia en zonas urbanas [4].	5
Figura 2.2 Perfil del viento en un área urbana [4].	5
Figura 2.3. Esquema de la capa límite urbana [8].	6
Figura 2.4 Turbulencia en la capa límite [12].	7
Figura 2.5. Clasificación de aerogeneradores [4].	9
Figura 2.6. Comparativa entre un aerogenerador tipo ASWT y una turbina tipo propela basada en la referencia [26].	13
Figura 2.7. Comparativa de potencia generada por los aerogeneradores tipo ASWT y Savonius, basada en la referencia [27].	13
Figura 2.8. Diseño de aerogenerador en espiral tipo caparazón [49].	20
Figura 3.1 Ejemplificación del uso de la energía eólica [51].	25
Figura 3.2 Fuerzas de sustentación y de arrastre [53].	27
Figura 3.3. Clasificación de aerogeneradores [elaboración propia].	28
Figura 3.4: Modelo de disco actuador de una turbina eólica; U , velocidad media del viento; 1, 2, 3 y 4 indican ubicaciones [55].	29
Figura 3.5 Parámetros de funcionamiento de una turbina Betz; U , velocidad del aire no perturbado; U_4 , velocidad del aire detrás del rotor; C_p , coeficiente de potencia; C_T , coeficiente de empuje [55].	32
Figura 3.6 Espiral de Fibonacci en una concha de mar [56].	33
Figura 3.7. Espiral de Arquímedes [57].	34
Figura 3.8. Análisis de fuerzas aerodinámicas en el rotor ASWT [1].	35
Figura 3.9 (a) Flujo laminar (b) Flujo turbulento [58].	36
Figura 3.10. Perfil del viento urbano, compuesto por la UBL y la UCL [7].	37
Figura 3.11. Representación conceptual del flujo alrededor de un edificio [7].	38
Figura 3.12. Posible colocación de aerogeneradores para aprovechar la aceleración del flujo. (a) En el techo; (b) En fachada lateral; (c) Entre edificios [7].	38
Figura 4.1 Metodología propuesta para el desarrollo del trabajo de investigación.	41
Figura 5.1 Edificio de posgrado del Instituto de Energías Renovables, UNAM.	42
Figura 5.2 Anemómetro ultrasónico de tres ejes.	43
Figura 5.3 Anemómetro ultrasónico Wind Master 3D Gill Instruments en el edificio de posgrado del Instituto de Energías Renovables.	43
Figura 5.4 Serie temporal con muestra de datos no capturados.	44
Figura 5.5 Gráfica con el intervalo de datos no capturados en el primer periodo.	45
Figura 5.6 Gráfica con el intervalo de datos no capturados en el segundo periodo.	45
Figura 5.7 Representación del plano horizontal dado por los ejes X y Y.	47
Figura 5.8 Espectro horizontal de velocidad del viento por Van der Hoven [59].	48
Figura 5.9 Rosa de los vientos de elaboración propia.	49
Figura 5.10 Serie temporal temperatura de elaboración propia.	51

Figura 5.11 Serie temporal viento de elaboración propia.....	52
Figura 5.12 Histograma velocidades de viento de elaboración propia.....	53
Figura 5.13 Serie Temporal Intensidad Turbulencia de elaboración propia.	54
Figura 5.14 Histograma Intensidad Turbulencia de elaboración propia.	55
Figura 5.15 Serie Temporal Velocidades Máximas de elaboración propia.....	56
Figura 5.16 Serie Temporal Velocidades Mínimas de elaboración propia.	56
Figura 7.1 Comparación de porcentaje de eficiencia entre la turbina en espiral con tres aspas y una turbina tipo propela basada en la referencia [28].	68
Figura 7.2 Comparación de C_p de a) Espiral logarítmico y b) Espiral de Arquímedes con distintos ángulos de apertura. [43].....	69
Figura 7.3 Comparación de C_p vs TSR para las cinco relaciones de aspecto.....	70
Figura 7.4 Comparación de C_p con distintos ángulos de apertura.	70
Figura 7.5 Comparación de C_p máximo con distintos ángulos de apertura.	71
Figura 7.6 Comparación de C_p con distintos ángulos de aspa.	72
Figura 7.7 Comparación de CT máximo con distintos ángulos de aspa.....	72
Figura 8.1 Propuestas de aerogeneradores ASWT con ángulos fijos a) Song <i>et al.</i> [1], b) Nawar <i>et al.</i> [40].	74
Figura 8.2 Propuesta inicial del aerogenerador ASWT con ángulos fijos.....	74
Figura 8.3 Medidas del aerogenerador ASWT propuesto.	75
Figura 9.1. Dimensiones aerogenerador ASWT basado en la referencia [40].	76
Figura 9.2 Modelo del rotor del aerogenerador propuesto en impresión 3D.	77
Figura 9.3 Modelos físicos de los rotores de los aerogeneradores ASWT (a) diseño reportado en la literatura con ángulos fijos, (b) diseño propuesto.	77
Figura 9.4 (a) Pruebas experimentales en el Cenidet Campus Xochitepec (b) Ubicación del Cenidet Campus Xochitepec.	78
Figura 9.5 Pruebas experimentales de ambos diseños de rotor del aerogenerador ASWT..	79
Figura 9.6 . Prueba del rotor de referencia y medición de la velocidad del viento.	80
Figura 9.7 . Prueba del rotor propuesto y medición de la velocidad del viento.	80
Figura 9.8 . Velocidad de giro del rotor de referencia.....	81
Figura 9.9 . Velocidad de giro del rotor propuesto.....	81
Figura 9.10 . Modelos físicos de los rotores de aerogeneradores ASWT para las pruebas en túnel de viento: (a) diseño reportado en la literatura con ángulos fijos; (b) diseño propuesto.	82
Figura 9.11 . Relación entre la velocidad del viento y el porcentaje de potencia del túnel de viento.	82
Figura 9.12 . Comportamiento de los modelos ASWT a diferentes porcentajes de potencia del túnel de viento.	83
Figura 9.13. Dominio computacional del aerogenerador ASWT de referencia: (a) Dimensiones (b) Vista de sección.	86
Figura 9.14. Malla utilizada para el dominio computacional del aerogenerador ASWT de referencia.	88

Figura 9.15. Análisis de independencia de malla para las simulaciones CFD.	90
Figura 9.16. Condiciones de frontera para el aerogenerador ASWT de referencia.....	92
Figura 9.17. Distribución de presiones en la superficie del aerogenerador (a) Verificación (b) Referencia.	94
Figura 9.18. Distribución de presiones sobre el aerogenerador (a) Verificación (b) Referencia.	96
Figura 9.19. Distribución de velocidades sobre la superficie del aerogenerador a) Verificación b) Referencia.....	97
Figura 9.20. Dominio computacional del aerogenerador ASWT propuesto: (a) Dimensiones (b) Vista de sección.	99
Figura 9.21. Malla utilizada para el dominio computacional del modelo propuesto.	100
Figura 9.22. Distribución de presiones en la superficie del aerogenerador (a) Verificación (b) Propuesto.	101
Figura 9.23. Distribución de presiones sobre el aerogenerador (a) Verificación (b) Propuesto.	102
Figura 9.24. Distribución de velocidades sobre la superficie del aerogenerador (a) Verificación (b) Propuesto.....	103
Figura 9.25. Distribuciones de presiones en las aspas del aerogenerador generadas en las simulaciones aerodinámicas CFD.	105
Figura 9.26. Condiciones de frontera: zonas de fijación del rotor (soportes fijos).	107
Figura 9.27. Condiciones de frontera: aplicación de la distribución de presiones sobre la superficie del rotor.....	107
Figura 9.28. Gráfica de independencia de malla para la evaluación estructural del aerogenerador ASWT de referencia.	109
Figura 9.29. Malla sobre el rotor con un tamaño de elemento de 10 mm.	110
Figura 9.30. Malla sobre el rotor con un tamaño de elemento de 1.75 mm.	111
Figura 9.31. Gráfica de independencia de malla para la evaluación estructural del aerogenerador ASWT propuesto.	112
Figura 9.32. Resultados de esfuerzos máximo malla (a) Burda, (b) Media, (c) Fina.....	113
Figura 9.33. Deformación de las aspas del aerogenerador ASWT en el estudio de referencia [48]	115
Figura 9.34. Esfuerzos en las aspas del aerogenerador ASWT en el estudio de referencia [48].	116
Figura 9.35. Distribuciones de deformación a) y esfuerzos b) para el diseño del aerogenerador de referencia utilizando PLA.	116
Figura 9.36. Zona de deformación máxima en las aspas del aerogenerador de referencia.	117
Figura 9.37. Zona de esfuerzo máximo en las aspas del aerogenerador de referencia.....	117
Figura 9.38. Distribuciones de deformación (a) y esfuerzos (b) del diseño propuesto utilizando PLA.....	118
Figura 9.39. Distribuciones de deformación (a) y esfuerzos (b) en el diseño de referencia utilizando Aluminio.	118

Figura 9.40. Distribuciones de deformación (a) y esfuerzos (b) en el diseño propuesto utilizando Aluminio.....	119
Figura 9.41. Distribuciones de deformación (a) y esfuerzos (b) en el diseño de referencia utilizando Fibra de Vidrio.	119
Figura 9.42. Distribuciones de deformación (a) y esfuerzos (b) en el diseño propuesto utilizando Fibra de Vidrio.	120
Figura 9.43. Distribuciones de deformación (a) y esfuerzos (b) en el diseño de referencia utilizando Fibra de Vidrio Epoxica.	120
Figura 9.44. Distribuciones de deformación (a) y esfuerzos (b) en el diseño propuesto utilizando Fibra de Vidrio Epoxica.	121
Figura 10.1. Curva de potencia del aerogenerador tipo ASWT propuesto.....	125
Figura 10.2. Gráfica de Producción de Energía Anual del aerogenerador tipo ASWT propuesto.	126
Figura 10.3. Consumo de equipos eléctricos de acuerdo con la Comisión Federal de Electricidad [76].	128

Lista de Tablas

Tabla 2.1. Comparativa entre aerogeneradores HAWT, VAWT y ASWT, basada en la referencia [23].....	14
Tabla 2.2 Resumen de investigaciones realizadas respecto a los aerogeneradores en espiral.	21
Tabla 5.1 Resumen del proceso de filtración de datos la base de datos generada experimentalmente.....	46
Tabla 5.2 Tabla de las propiedades del aire a 1 atm de presión [60].....	50
Tabla 6.1 Definición de parámetros de diseño en aerogeneradores tipo ASWT.....	58
Tabla 7.1 Comparación de torque obtenido para distintas configuraciones respecto al número de aspas basada en la referencia [28].	67
Tabla 9.1 Parámetros de diseño seleccionados para el aerogenerador propuesto.	76
Tabla 9.2 Resultados de prueba experimental de ambos aerogeneradores ASWT.	80
Tabla 9.3 Análisis de independencia de malla.	89
Tabla 9.4 Configuración de los parámetros de la simulación.....	92
Tabla 9.5 Comparación de resultados obtenidos referentes al torque.	98
Tabla 9.6 Porcentajes de diferencia entre el trabajo de referencia y el de verificación.	98
Tabla 9.7 Comparación de resultados entre modelo de verificación y propuesto.	104
Tabla 9.8 Análisis de independencia de malla para la evaluación estructural del aerogenerador ASWT de referencia.	108
Tabla 9.9 Análisis de independencia de malla para la evaluación estructural del aerogenerador ASWT propuesto.	109
Tabla 9.10 Propiedades mecánicas del Ácido Poliláctico (PLA).	114
Tabla 9.11 Propiedades mecánicas del Aluminio.....	114
Tabla 9.12 Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio.	114

Tabla 9.13 Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio epoxi.	114
Tabla 9.14 Resumen de los resultados de la evaluación estructural de los modelos ASWT de referencia y propuesto utilizando diferentes materiales.	121
Tabla 10.1 Resumen de los resultados de potencia a distintas velocidades.	124
Tabla 10.2 Estimación de Producción de Energía Anual (AEP) del aerogenerador tipo ASWT propuesto.	126

Nomenclatura

Acrónimos

ASWT	Aerogenerador en Espiral de Arquímedes.
AEP	Producción de Energía Anual.
BEM	Método de Momentum por Elemento de Aspa.
CAD	Diseño Asistido por Computadora.
CENIDET	Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
CFD	Dinámica de Fluidos Computacional.
Cp	Coeficiente de Potencia.
Ct	Coeficiente de Empuje.
FEM	Método de Elementos Finitos.
HAWT	Aerogenerador de Eje Horizontal.
IER	Instituto de Energías Renovables.
PIV	Velocimetría por Imágenes de Partículas.
PLA	Ácido Poliláctico.
RANS	Ecuaciones de Navier-Stokes Promediadas por Reynolds.
SST	Modelo de Transporte de Esfuerzo Cortante.
TSR	Relación de Velocidad Punta.
UBL	Capa Límite Urbana.
UCL	Capa De Cubierta Urbana.
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México.
VAWT	Aerogenerador de Eje Vertical.

Símbolos

U	Velocidad del flujo.	D	Diámetro del rotor.
ρ	Densidad.	L	Longitud del rotor.
T	Fuerza de empuje.	c	Velocidad del sonido en el fluido.
A	Área de barrido del rotor.	p	Presión del fluido.
$\dot{m}$	Flujo másico.	$\bar{U}_i \bar{U}_j$	Tensor de Reynolds.
P	Potencia mecánica.	ν	Viscosidad cinemática del fluido.
a	Coeficiente de inducción axial.	κ	Energía cinética turbulenta.
η	Eficiencia.	w	Tasa de disipación de la energía cinética turbulenta.
R	Radio del rotor.	C	Número de Courant.
ω	Velocidad angular.	Δt	Paso de tiempo en la simulación.
τ	Torque.	Δx	Tamaño de la malla.
λ	TSR – Relación de Velocidad Punta.	F	Vector de cargas actuantes sobre la estructura.
u_*	Velocidad de fricción en la superficie del suelo.	K	Matriz de rigidez de una estructura.
z	Altura sobre el suelo.	X	Vector de desplazamientos.
Z_0	Altura de rugosidad aerodinámica.	v_i	Velocidad del viento en cada intervalo bin.
d	Desplazamiento en el plano cero.	h	Número de horas al año.
σ_u	Desviación estándar de la velocidad del flujo.		

Resumen

En el presente estudio se abordó el diseño aerodinámico de una nueva configuración de aerogeneradores de eje horizontal, basada en un rotor inspirado en la espiral de Arquímedes, orientada a la generación distribuida de energía eléctrica de baja potencia en entornos urbanos. El objetivo principal fue reducir la influencia de las fluctuaciones del viento, características de los entornos urbanos. Además, se buscó lograr un intervalo de operación más amplio para el dispositivo, maximizando su rendimiento en condiciones de baja velocidad del viento.

El proceso inició con la caracterización del recurso eólico en un entorno urbano durante un año. Mediante un análisis estadístico de los datos recolectados, se identificaron parámetros clave como velocidades mínimas, máximas y promedio del viento, así como la intensidad de turbulencia. Además, se generaron series temporales y un histograma de frecuencia de ocurrencia de velocidades, fundamentales para comprender el patrón de comportamiento del recurso eólico en la zona de estudio y definir las condiciones de diseño del aerogenerador.

Con base en este análisis, se seleccionaron los parámetros de diseño más relevantes, lo que permitió proponer y evaluar diversas configuraciones geométricas del rotor con forma de espiral. Estas configuraciones fueron modeladas utilizando herramientas de Diseño Asistido por Computadora (CAD) y evaluadas mediante simulaciones numéricas basadas en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). El objetivo de este análisis fue estudiar los efectos de cada parámetro de diseño sobre el comportamiento aerodinámico del rotor y su impacto en la eficiencia general del aerogenerador.

Como parte del desarrollo experimental, se fabricó un prototipo del diseño propuesto utilizando técnicas de manufactura aditiva (impresión 3D), junto con un modelo de referencia basado en información reportada en la literatura. Este modelo de referencia se empleó para realizar una validación comparativa experimental y numérica, lo que ayudó a demostrar las ventajas del nuevo diseño, especialmente en su capacidad para operar eficientemente a bajas velocidades del viento. Además, se realizó un análisis estructural del modelo propuesto con el fin de identificar las zonas del rotor que presentan mayores esfuerzos y deformaciones. Este estudio consideró materiales típicamente utilizados en la fabricación de aerogeneradores de esta categoría, concluyendo que los esfuerzos y deformaciones generados por una velocidad del viento de 8 m/s se mantienen dentro de los límites aceptables. Cabe destacar que esta velocidad corresponde a una de las más frecuentes y de mayor magnitud en el análisis estadístico de datos.

Finalmente, a partir de la curva de potencia obtenida mediante CFD y del histograma de frecuencia de velocidades, se estimó la producción anual de energía. Los resultados indican que el aerogenerador propuesto, con un diseño compacto de 25 cm de diámetro y longitud, es capaz de generar la energía suficiente para alimentar tres focos LED de 8 W encendidos cinco horas diarias durante todo un año.

Abstract

In the present study, the aerodynamic design of a new configuration of horizontal-axis wind turbines was addressed, based on a rotor inspired by the Archimedes spiral, aimed at the distributed generation of low-power electrical energy in urban environments. The main objective was to reduce the influence of wind fluctuations, characteristic of urban environments. Additionally, an effort was made to achieve a wider operating range for the device, maximizing its performance in low wind speed conditions.

The process began with the characterization of the wind resource in an urban environment over the course of a year. Through a statistical analysis of the collected data, key parameters such as minimum, maximum, and average wind speeds, as well as turbulence intensity, were identified. Additionally, time series and a histogram of wind speed occurrence frequency were generated, which are essential for understanding the behavior pattern of the wind resource in the study area and defining the design conditions of the wind turbine.

Based on this analysis, the most relevant design parameters were selected, which allowed for the proposal and evaluation of various geometric configurations of the spiral-shaped rotor. These configurations were modeled using Computer-Aided Design (CAD) tools and evaluated through numerical simulations based on Computational Fluid Dynamics (CFD). The objective of this analysis was to study the effects of each design parameter on the aerodynamic behavior of the rotor and its impact on the overall efficiency of the wind turbine.

As part of the experimental development, a prototype of the proposed design was manufactured using additive manufacturing techniques (3D printing), along with a reference model based on information reported in the literature. This reference model was used to conduct a comparative experimental and numerical validation, which helped demonstrate the advantages of the new design, especially in its ability to operate efficiently at low wind speeds. Additionally, a structural analysis of the proposed model was conducted to identify the areas of the rotor that exhibit the highest stresses and deformations. This study considered materials typically used in the manufacturing of wind turbines of this category, concluding that the stresses and deformations generated by a wind speed of 8 m/s remain within acceptable limits. It is worth noting that this speed corresponds to one of the most frequent and highest magnitudes in the statistical data analysis.

Finally, based on the power curve obtained through CFD and the velocity frequency histogram, the annual energy production was estimated. The results indicate that the proposed wind turbine, with a compact design of 25 cm in diameter and length, is capable of generating enough energy to power three 8 W LED bulbs for five hours daily throughout the entire year.

1 Introducción

A nivel mundial, los combustibles fósiles han provocado diversos problemas, entre los que se incluyen la contaminación ambiental, el cambio climático y el calentamiento global. Ante esta situación, la energía eólica, ha surgido como una alternativa limpia y libre de emisiones de carbono frente a los combustibles fósiles tradicionales.

En los últimos años, el incremento en la demanda de fuentes de energía renovable y el desarrollo de edificaciones energéticamente autosuficientes han impulsado la investigación orientada a mejorar las tecnologías renovables, como energía eólica y los sistemas híbridos aplicados a entornos urbanos. No obstante, la integración de aerogeneradores en entornos urbanos presenta desafíos significativos, principalmente debido a la inestabilidad del recurso eólico provocada por la compleja morfología urbana.

Los aerogeneradores se clasifican según la orientación de su eje de rotación en dos tipos: aerogeneradores de eje horizontal (HAWT, por sus siglas en inglés) y de eje vertical (VAWT, por sus siglas en inglés). Los HAWT convencionales, típicamente de tres aspas, son los más comúnmente utilizados y cuentan con tecnologías relativamente consolidadas. Sin embargo, presentan limitaciones asociadas a su gran tamaño y al comportamiento del viento turbulento en áreas urbanas. Por el contrario, los aerogeneradores VAWT ofrecen ventajas notables, como la capacidad de operar eficientemente con vientos provenientes de múltiples direcciones, lo que los hace especialmente adecuados para entornos urbanos donde la dirección del viento cambia con frecuencia. A pesar de ello, presentan el inconveniente de requerir mecanismos de arranque para operar a bajas velocidades, lo que repercute en una menor eficiencia global del sistema.

Con el objetivo de aprovechar al máximo la energía cinética disponible en el viento en áreas urbanas, se ha propuesto un nuevo tipo de aerogenerador de eje horizontal, denominado *Aerogenerador en Espiral de Arquímedes* (ASWT, por sus siglas en inglés). Este modelo de aerogenerador es capaz de operar a bajas velocidades del viento y presenta un rendimiento superior en condiciones de flujo turbulento, gracias a su diseño innovador. Además, incorpora un sistema de orientación pasivo que le permite adaptarse eficientemente a diversas direcciones del viento [1].

Dado que los aerogeneradores ASWT aún se encuentran en fase investigación, continúan desarrollando nuevas configuraciones con el fin de superar sus limitaciones. El propósito de esta investigación es mejorar la captación de energía eólica en entornos urbanos y contribuir así al desarrollo de ciudades sostenibles, impulsadas por fuentes de energía verde.

2 Estado del Arte

Con base en lo revisado en la literatura, y en el enfoque adoptado para el presente proyecto de investigación, el estudio del estado del arte se ha estructurado en cuatro diferentes secciones:

- **Aerogeneradores en entornos urbanos:**
Se analiza la implementación, los desafíos y las oportunidades asociadas al uso de aerogeneradores en zonas urbanas, considerando las particularidades del viento en estos entornos.
- **Introducción a los Aerogeneradores en Espiral de Arquímedes (ASWT):**
Se presenta una descripción general del concepto, funcionamiento y características del aerogenerador ASWT, destacando su diseño innovador y su adaptación a condiciones urbanas.
- **Comparativa de los aerogeneradores ASWT con respecto a otros tipos de aerogeneradores:**
Se comparan ventajas y desventajas del ASWT frente a otras tecnologías eólicas en términos de eficiencia, adaptabilidad y aplicabilidad urbana.
- **Parámetros y variables en el diseño de aerogeneradores ASWT:**
Se exploran los principales factores que influyen en el diseño de este tipo de aerogeneradores.

2.1. Aerogeneradores en entornos urbanos

En entornos urbanos, las características del flujo del viento son más complejas que en los parques eólicos convencionales. Las ciudades presentan una alta densidad de edificaciones y estructuras que generan una superficie de gran rugosidad, lo que afecta significativamente el perfil del viento. Estas construcciones interfieren con el flujo viento en la capa límite atmosférica inferior, provocando cambios bruscos en su dirección e incrementando la intensidad de la turbulencia.

Este tipo de comportamiento del viento contribuye a la variabilidad e imprevisibilidad de la energía eólica en las zonas urbanas [2],[3], como se ilustra en la Figura 2.1. Asimismo, las dimensiones y geometría de los edificios influyen directamente en las condiciones del viento sobre sus techos. Por lo tanto, sin una evaluación adecuada de estos factores, resulta difícil seleccionar una posición efectiva para la instalación de un aerogenerador [4].

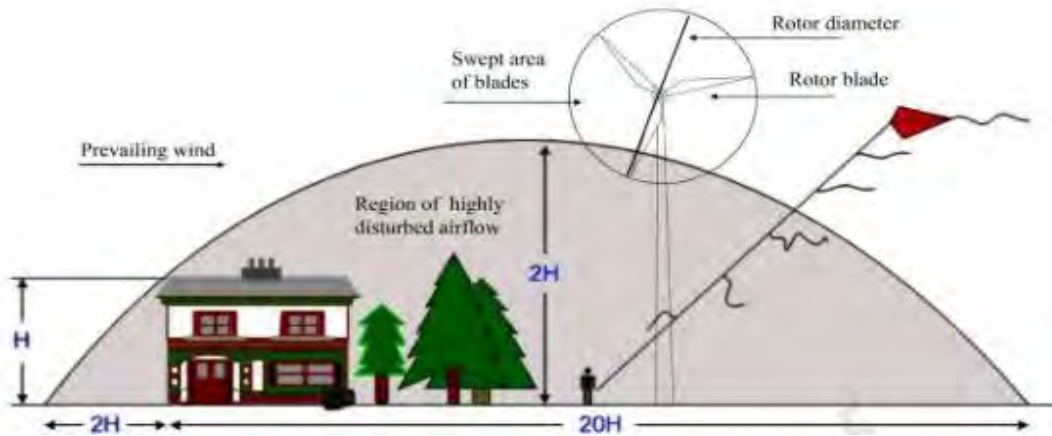


Figura 2.1 Variación de la velocidad del viento debido a la rugosidad de superficie y a la turbulencia en zonas urbanas [4].

La aerodinámica en entornos urbanos presenta una elevada complejidad. Los flujos de viento en estas áreas siguen siendo objeto de estudio tanto a nivel experimental como numérico, debido a la influencia simultánea de múltiples factores independientes. Entre ellos destacan la complejidad de las geometrías y las disposiciones de los edificios, los cuales introducen formas irregulares y generan fricción en el flujo de viento. Además, los gradientes de presión que se desarrollan a lo largo de la altura de los edificios inducen la formación de remolinos intensos y fenómenos de recirculación del viento [5].

Dentro de este contexto, dos conceptos clave en la investigación sobre el aprovechamiento de energía eólica urbana son la *Urban Canopy Layer* (UCL, por sus siglas en inglés), que corresponde a la región comprendida desde el nivel del suelo hasta aproximadamente la altura de los techos, y la *Urban Boundary Layer* (UBL, por sus siglas en inglés), que se extiende desde el nivel de los techos hacia arriba, siendo esta última afectada por la turbulencia generada en la capa inferior [6], [7]. Ambos fenómenos se representan en la Figura 2.2.

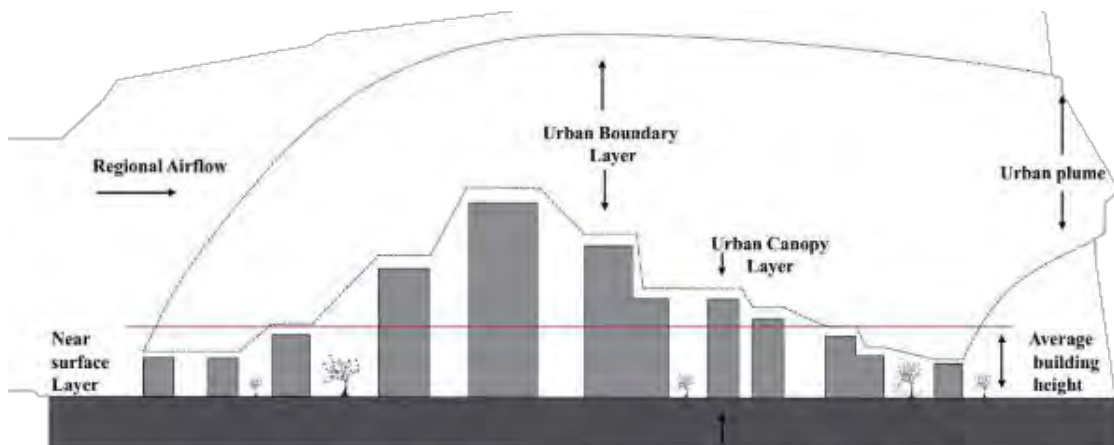


Figura 2.2 Perfil del viento en un área urbana [4].

Desde una perspectiva estructural y evolutiva, la capa límite urbana puede dividirse en tres secciones principales: la capa de cubierta urbana (*Urban Canopy Layer*), la subcapa de rugosidad (*Roughness Sublayer*) y la subcapa inercial (*Inertial Sublayer*), las cuales se ilustran en la Figura 2.3.

La capa de cubierta urbana es la sección más baja de la capa límite urbana, con una profundidad aproximada a la altura media de los elementos de rugosidad (H), generalmente representada por la altura promedio de los edificios. En esta capa, el flujo está altamente influenciado por su interacción directa con la rugosidad superficial, lo que genera fenómenos de canalización del viento a nivel del suelo.

Por encima de esta se encuentra la subcapa de rugosidad, cuya influencia puede abarcar entre dos y cinco veces la altura media del edificio H . Aunque el efecto de la rugosidad persiste en esta zona, su influencia es progresivamente menor.

Finalmente, la subcapa inercial se localiza a una altura superior a cinco veces la altura media del edificio, y en ella el flujo se caracteriza por una turbulencia relativamente más uniforme y menos afectada por la rugosidad de la superficie [8].

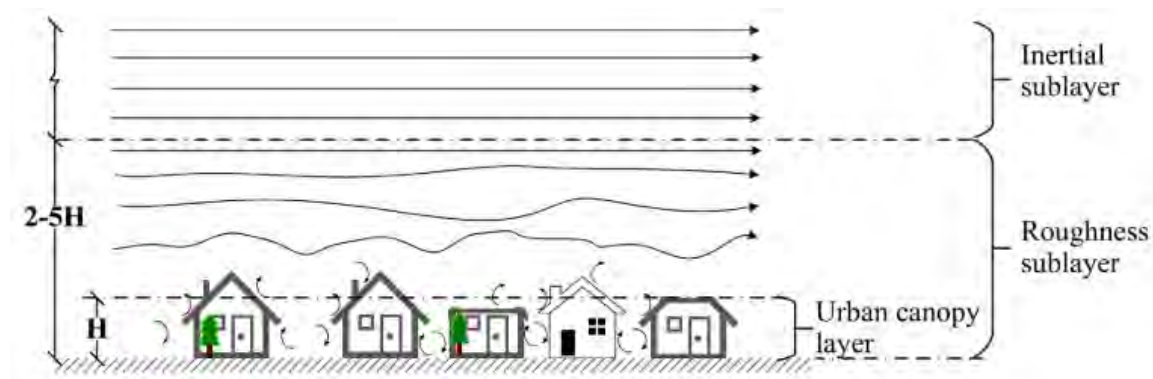


Figura 2.3. Esquema de la capa límite urbana [8].

Es importante conocer las características del flujo del viento en la capa de cubierta urbana por las siguientes razones:

- Para analizar la difusión de contaminantes en las calles.
- Para evaluar el confort del viento a nivel de peatones.
- Para los procesos de caracterización de la carga del viento en estructuras de tamaño pequeño a mediano en el entorno urbano.

Para la evaluación de los recursos eólicos en un sitio específico, se han empleado diversos métodos. Entre los más comunes se encuentran el uso de funciones matemáticas probabilísticas como las distribuciones de Weibull y Rayleigh; la consulta de atlas eólicos; métodos indirectos como pruebas en túneles de viento para simular la capa límite

atmosférica; y simulaciones numéricas basadas en la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) [9].

Tabrizi *et al.* [10] identificaron dos parámetros clave en la medición del viento: la frecuencia con la que un sistema de adquisición de datos (DAQ, por sus siglas en inglés) toma muestras del sensor, y el intervalo de tiempo para promediar los datos registrados. En su estudio evaluaron el efecto de la tasa de muestreo y del periodo promediado sobre las mediciones de turbulencia obtenidas por su sistema de monitoreo instalado en la azotea de un edificio. El objetivo fue contribuir al desarrollo de lineamientos adecuados para la medición en entornos urbanos.

Los autores concluyeron que una frecuencia de muestreo de 10 Hz y un intervalo de promediado de 10 minutos permiten obtener estimaciones confiables de la intensidad de la turbulencia y de los valores máximos de los espectros de potencia. Estos parámetros son fundamentales en el diseño de aerogeneradores, ya que permiten considerar adecuadamente tanto de las cargas de fatiga como los efectos de resonancia inducidos por ráfagas de viento.

Por su parte, la norma IEC61400-12-1 establece el procedimiento para la medición de los recursos eólicos. En el caso de aerogeneradores de pequeña escala, se recomienda un periodo de integración de un minuto para evaluar su respuesta frente a las fluctuaciones del viento. En años recientes, ha aumentado la tendencia a instalar aerogeneradores pequeños en entornos más complejos que en terrenos abiertos tradicionales. Estos sitios incluyen áreas cercanas a edificaciones, árboles u otros obstáculos, donde el flujo de viento tiende a ser más turbulento, inestable y de baja velocidad [11].

La turbulencia se define como las variaciones estocásticas en la velocidad del viento, observadas en sus tres componentes: longitudinal, lateral y vertical. En el análisis del recurso eólico, una medida común para cuantificar la turbulencia es la intensidad de la turbulencia, una magnitud adimensional que se calcula como la relación entre la desviación estándar de la velocidad del viento y su valor medio, ambos obtenidos a partir del mismo conjunto de datos. Esta intensidad proporciona una estimación del nivel de inestabilidad del flujo y es un parámetro clave en el diseño y análisis estructural de aerogeneradores. En la Figura 2.4 se ilustran las variaciones del viento y la formación de flujo turbulento en zonas cercanas a la superficie terrestre, donde los efectos de la rugosidad y obstáculos son más pronunciados.



Figura 2.4 Turbulencia en la capa límite [12].

De acuerdo con la norma IEC6400-2, utilizada para establecer los requisitos de diseño de aerogeneradores de pequeña escala, se emplea un Modelo Normal de Turbulencia (NTM, por sus siglas en inglés). Este modelo describe tanto la intensidad de turbulencia como su comportamiento general, considerando las variaciones en la velocidad y dirección del viento [13].

Los aerogeneradores diseñados para entornos urbanos enfrentan diversas restricciones, y deben cumplir con criterios específicos relacionados con su tamaño, niveles máximos de ruido, impacto visual y bajas velocidades del viento inicial. La potencia de salida de un aerogenerador depende de múltiples factores, entre los que destacan: la eficiencia aerodinámica de las aspas, la correspondencia entre las características del rotor y del generador eléctrico, ubicación de la instalación, y las condiciones del recurso eólico disponible. Esto último incluye parámetros como el perfil del flujo, la densidad del aire, la velocidad media del viento y el nivel de turbulencia [14],[15]. En particular, la turbulencia en entornos urbanos puede contribuir a una reducción de entre el 15% al 30% en la potencia de salida del aerogenerador, afectando significativamente su desempeño y eficiencia operativa.

Uno de los problemas más comunes que enfrentan los residentes en zonas urbanas es el ruido producido por los aerogeneradores. Para minimizar el impacto acústico, se recomienda que el nivel de ruido no supere los 45 dB a una distancia aproximada de 300 metros de zonas residenciales [16]. Existen criterios técnicos fundamentales que deben cumplirse para considerar viable la generación de energía eólica en entornos urbanos. De acuerdo con Dilimulati *et al.* [14], estos requisitos incluyen:

- Una velocidad promedio del viento mínima de 5.5 m/s.
- La instalación del aerogenerador en una altura al menos un 50% superior a la de las estructuras circundantes.
- La colocación del aerogenerador por encima de la capa límite turbulenta, manteniendo una distancia adecuada respecto al techo.

Además, según la clasificación propuesta por Tasneem *et al.* [4], los aerogeneradores pueden categorizarse en función de tres parámetros principales: el tipo de su eje de rotación, el diámetro del rotor y la potencia nominal. Esta clasificación se presenta en la Figura 2.5.

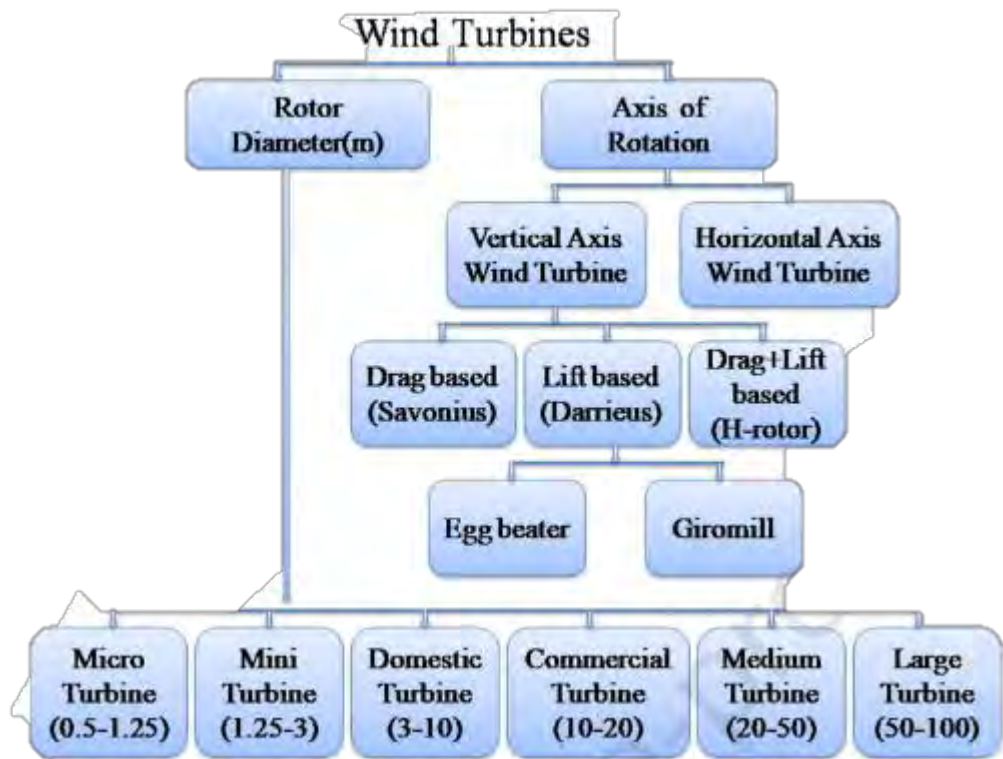


Figura 2.5. Clasificación de aerogeneradores [4].

Diversos tipos de aerogeneradores se han conceptualizado en función de los principios de la aerodinámica de sustentación y de arrastre, así como de la geometría del rotor y la orientación del eje de rotación. En términos generales, los aerogeneradores pueden clasificarse en dos grandes grupos según la orientación de su eje de rotación: los aerogeneradores de eje horizontal (HAWT) y aerogeneradores de eje vertical (VAWT). En contextos urbanos, la implementación de los HAWT presenta ciertas dificultades debido a la variabilidad constante en la velocidad y la dirección del viento, además de la alta turbulencia, lo que complica su operación eficiente.

Por otro lado, los aerogeneradores VAWT se subdividen en dos tipos principales:

- De sustentación, como el tipo Darrieus.
- De arrastre, como el tipo Savonius.

Los HAWT son los más utilizados a nivel global, diversos estudios han demostrado que los VAWT ofrecen un mejor desempeño en aplicaciones urbanas, debido a su capacidad de operar bajo condiciones de viento turbulento e inestable [14].

Se ha considerado el uso de micro aerogeneradores diseñados para ser instalados en nuevas edificaciones o en ya existentes, con el objetivo de generar electricidad a pequeña escala. Estas tecnologías de microgeneración tienen el potencial de contribuir a la reducción de

emisiones de CO₂ asociadas al consumo energético en entornos urbanos, además de representar una disminución en los costos relacionados con el suministro eléctrico convencional [17].

Para caracterizar el comportamiento de aerogeneradores, se emplean diversas técnicas modelado, entre las cuales se incluyen:

- Modelado de tubos de corriente múltiple.
- Método de *Momentum* por Elemento de Aspa (*Blade Element Momentum*, BEM).
- Dinámica de Fluidos Computacional CFD en dos y tres dimensiones.
- Dinámica de Fluidos Experimental (EFD, por sus siglas en inglés).
- Modelo de Reynolds Promediado Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS).
- Método de Elemento Finito Directo (DFE, por sus siglas en inglés) [4].

Estas herramientas permiten predecir con mayor precisión el desempeño aerodinámico, estructural y energético de los aerogeneradores bajo diferentes condiciones de operación y entornos urbanos.

2.2. Introducción de los Aerogeneradores en Espiral de Arquímedes (ASWT)

En el ámbito de los aerogeneradores de baja potencia para entornos urbanos, el desarrollo se ha centrado principalmente en diseños de eje vertical (VAWT). No obstante, recientemente se ha propuesto un nuevo tipo de aerogenerador de eje horizontal (HAWT), diseñado para operar eficientemente en contextos urbanos. Este tipo de dispositivo es conocido como Aerogeneradores en Espiral de Arquímedes (ASWT, por sus siglas en inglés).

Qian *et al.* [18] describen el desempeño de un innovador diseño de aerogenerador de baja potencia, basado en un principio de espiral inspirado en Arquímedes. A través del uso de ecuaciones teóricas, los autores predijeron sus características aerodinámicas considerando diversos parámetros de diseño de las aspas. Estos resultados teóricos fueron verificados mediante simulaciones numéricas realizadas con el software ANSYS CFX.

Con base en la relación entre la velocidad del viento y la potencia generada, los autores reportan una eficiencia máxima aproximada del 25% con una relación de velocidad de punta de 2.5. Esta eficiencia es relativamente baja en comparación con la alcanzada por los aerogeneradores convencionales de tipo hélice.

Kim *et al.* [19],[20], realizaron mediciones de velocidades instantáneas del viento mediante el método bidimensional de velocimetría de imagen de partículas (PIV, por sus siglas en inglés) en el área cercana del aspa, con el propósito de estudiar las características aerodinámicas del aspa y caracterizar la evolución de las estructuras de los vórtices en la punta del aspa. Las pruebas fueron realizadas en intervalos de velocidades de viento de 5 a 12 m/s, a partir de cual determinaron un Coeficiente de Potencia máximo (C_p) de 0.25.

Dentro de sus principales hallazgos, identificaron que la interacción entre el flujo de la estela en el rotor aguas abajo y la velocidad en la punta del aspa inducida por los vórtices, se ve afectada fuertemente por la velocidad del viento y la velocidad de rotación resultante del aspa. De similar manera, Safdari *et al.* [21] evaluaron el comportamiento del flujo alrededor del aerogenerador y la eficiencia energética cerca de la estela del aspa empleando la técnica PIV. Reportando que el aspa puede alcanzar velocidades angulares cercanas a 500 rpm con una velocidad del flujo de viento a la entrada de 4.5 m/s. Basado en esas condiciones de operación, identificaron el coeficiente de potencia máximo de 0.25, el cual corresponde a la máxima eficiencia del aerogenerador. Además, observaron la formación de vórtices aguas abajo y cerca de la raíz de las aspas.

Chaudhary *et al.* [22], se enfocaron al diseño y a la fabricación de un aerogenerador ASWT, con el propósito de evaluar un nuevo mecanismo de control (*yawing*), el cual se caracteriza por no utilizar componentes electrónicos. Este dispositivo de control se utiliza para determinar la dirección del viento y girar el rotor hacia la dirección predominante para maximizar la cantidad de energía obtenida. La construcción del aerogenerador se basó en el uso de láminas de aluminio de 0.91 mm de espesor, montadas sobre un eje de aluminio con un diámetro exterior de 32 mm y un diámetro interior de 26 mm. La estructura de montaje del rotor y el marco de la base se construyeron utilizando tubos de acero de sección transversal rectangular ($40 \times 15 \times 1.5$ mm). Como parte de su investigación, concluyeron que, la mínima velocidad del flujo de viento de trabajo debe ser de aproximadamente 2.5 m/s, así como que no era necesario un sistema de control basado en componentes electrónicos para el mecanismo de orientación (*yawing*) debido a que el aerogenerador combina el aprovechamiento de las fuerzas de sustentación y arrastre del viento.

Ozeh *et al.* [23], desarrollaron una investigación experimental sobre el diseño de un prototipo de aerogenerador ASWT, cuyo diámetro exterior de las aspas es de 100 mm utilizando una hélice para formar las tres aspas, girando con un ángulo de 120° para obtener un barrido de 360° . Los resultados mostraron que es un diseño viable para la obtención de energía en entornos urbanos, ya que permite aprovechar el viento en zonas con regímenes de baja velocidad, a menores a 10 m. El prototipo operó un rango de velocidades del viento de 2.9 hasta 25 m/s, generando un voltaje promedio de 3.65 V y una potencia promedio de 7.01 W. La velocidad límite de operación fue de 35 m/s, determinada por las restricciones estructurales del diseño.

Ebrahimi *et al.* [24] evaluaron el desempeño del aerogenerador ASWT mediante simulaciones numéricas utilizando el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST. Estas simulaciones permitieron obtener información sobre la distribución de presiones y el coeficiente de potencia. Se observó que, al ingresar el viento al rotor, se genera una diferencia de presiones entre la parte frontal y posterior del mismo. Gracias a la forma en espiral de las aspas. Esta diferencia de presiones produce una fuerza que, a su vez, genera torque y potencia. La diferencia de presión es especialmente alta en las puntas de las aspas y disminuye hacia el

centro, lo que indica que la mayor parte de la energía se extrae en las regiones externas. El coeficiente de potencia máximo alcanzado fue de 0.26.

Ji *et al.* [25], evaluaron el efecto de la variación del ángulo de ataque sobre el desempeño de un prototipo de aerogenerador tipo ASWT, en términos de potencia de salida y coeficiente de potencia. Para introducir esta variación, incorporaron un sistema de orientación al diseño original del prototipo.

La evaluación experimental fue llevada a cabo en un aerogenerador de 1.5 m de diámetro, fabricado mediante un proceso de laminado con resina FRP y fibra de vidrio, reforzado con elementos de acero inoxidable que conectan las aspas con el eje del rotor.

En el caso del modelo original, sin sistema de orientación, se evaluaron velocidades de viento de 3 hasta 11 m/s en incrementos de 1 m/s. Se obtuvo una potencia máxima de 737 W a una velocidad de viento de 11 m/s, para una velocidad angular de 29.77 rpm y un control de modulación por ancho de pulso del 35%. Estos resultados muestran un coeficiente de potencia de 51.17%, comparable al de turbinas multiaspas modernas.

Para el modelo con variación del ángulo de ataque, se evaluaron velocidades de viento entre 6 y 12 m/s, con incrementos de 3 m/s. En estas condiciones, la potencia máxima alcanzada fue de 915.94 W a una velocidad de viento de 12 m/s, con una velocidad angular de 37.95 rpm y un control de modulación del ancho de pulso de 45%.

2.3. Comparativa de los aerogeneradores tipo ASWT respecto a otros tipos de aerogeneradores

Diversos estudios han comparado el desempeño de aerogeneradores tipo ASWT con aerogeneradores de eje vertical y de eje horizontal. Mustafa *et al.* [26] diseñaron y fabricaron un aerogenerador ASWT a pequeña escala con el propósito de realizar una comparación experimental frente a una turbina tipo hélice o propela.

El experimento se realizó variando el ángulo de ataque entre 0° a 30°, y las velocidades del viento entre 6 a 10 m/s. Durante las pruebas, se midió tanto la potencia mecánica generada por los rotores como la electricidad producida. Los resultados mostraron que el aerogenerador tipo ASWT superó a la turbina tipo propela en términos del coeficiente de potencia y potencia eléctrica. En particular, el ASWT alcanzó un valor máximo de coeficiente de potencia de 61.77% de a una velocidad del viento de 10 m/s, mientras que la turbina tipo propela obtuvo un pico de coeficiente de potencia de 57.2% a 8.4 m/s. Un resumen de esta comparación se presenta en la Figura 2.6.

Potencia de entrada del viento (W)	Potencia de la turbina (W)		Coeficiente de Potencia, C_p (%)		Velocidad Punta del Aspa, TSR		Potencia Eléctrica (W)	
	Espiral	Propela	Espiral	Propela	Espiral	Propela	Espiral	Propela
2.659	1.573	1.402	58.56	52.73	1.077	1.443	0.547	0.475
4.044	2.393	2.213	58.97	54.72	1.122	1.595	0.882	0.590
5.404	3.198	2.982	59.18	55.18	1.093	1.532	1.502	0.976
7.297	4.324	4.320	59.24	57.20	1.085	1.386	1.575	1.390
8.390	4.964	4.401	59.87	52.46	1.231	1.406	1.884	1.449
10.223	6.314	5.814	60.75	56.86	1.190	1.324	2.089	1.884
12.311	7.605	6.743	61.77	54.77	1.167	1.257	2.257	2.081

Figura 2.6. Comparativa entre un aerogenerador tipo ASWT y una turbina tipo propela basada en la referencia [26].

Por otro lado, Ostia *et al*, [27] realizaron una comparación entre un aerogenerador tipo ASWT y un tipo Savonius. Para ello, integraron diversos parámetros operativos, tales como voltaje, corriente, velocidad de rotación, nivel de carga de la batería, velocidad del viento y velocidad de giro del aerogenerador.

Los resultados mostraron que el aerogenerador tipo ASWT fue capaz de generar un voltaje promedio de 7.04V, mientras que el tipo Savonius alcanzó un promedio de 2.70 V. En la Figura 2.7, se presenta una comparación de la potencia generada para ambos aerogeneradores en función de diferentes velocidades del viento.

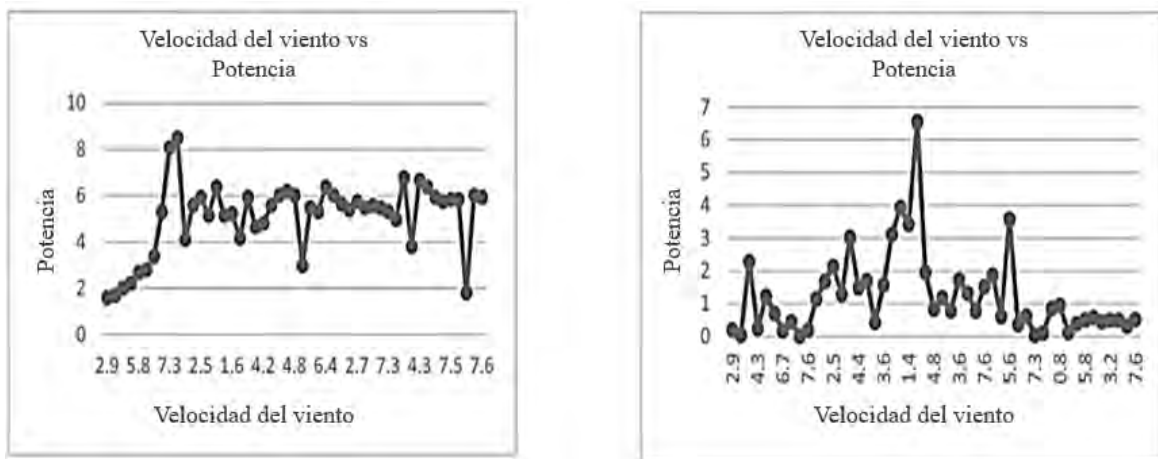


Figura 2.7. Comparativa de potencia generada por los aerogeneradores tipo ASWT y Savonius, basada en la referencia [27].

Como resultado de su investigación, Ozeh *et al.* [23] presentan, en la Tabla 2.1, una comparación de las principales características y diferencias entre los aerogeneradores de eje horizontal (HAWT), de eje vertical (VAWT) y de tipo espiral o helicoidal (ASWT).

Tabla 2.1. Comparativa entre aerogeneradores HAWT, VAWT y ASWT, basada en la referencia [23]

Aerogeneradores de Eje Horizontal (HAWT)	Aerogeneradores de Eje Vertical (VAWT)	Aerogeneradores en Espiral de Arquímedes (ASWT)
Necesita estar orientada hacia el viento.	Puede recolectar el viento de cualquier dirección sin necesidad de componentes de orientación.	Utiliza un sistema de control pasivo para su orientación hacia el viento.
Generador y caja de cambios están a grandes alturas.	Generador y caja de cambios están cerca de la superficie.	Generador y caja de cambios no necesitan mucha altura.
Potencial para aplicaciones a gran escala.	Potencial para aplicaciones a bajas escalas.	Puede ampliarse o reducirse para distintas aplicaciones basado en su geometría.
Utiliza fuerza de sustentación.	Utiliza la fuerza de arrastre.	Puede utilizar fuerza de sustentación y de arrastre.
Eficiente a más altas velocidades de viento.	Eficiente a bajas velocidades del viento, aunque requiere de un arrancador.	Eficiente a bajas velocidades del viento.

2.4. Parámetros y variables en el diseño de aerogeneradores tipo ASWT

Con el propósito de mejorar el desempeño de los aerogeneradores para su aplicación en entornos urbanos, diversas investigaciones han explorado configuraciones innovadoras, entre las que destaca el diseño de aerogeneradores tipo ASWT.

Suntivarakorn *et al.* [28] propusieron el diseño de una turbina en espiral basada en la proporción áurea, como guía para la geometría rotor. En este estudio, evaluaron experimentalmente el efecto del número de aspas (entre 2 y 6) sobre el torque generado por una turbina de 10 cm de diámetro. Los resultados de las pruebas de laboratorio indicaron que el número óptimo de aspas es tres, alcanzando una eficiencia del 45.5%.

Por su parte, Ji *et al.* [29] realizaron en 2016 un análisis detallado de las características aerodinámicas en la estela cercana a las aspas del aerogenerador, utilizando la técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV). Asimismo, examinaron el efecto de la dirección del viento sobre distintos planos de medición, considerando ángulos de incidencia entre 0° y 15°. Sus observaciones mostraron que, cuando el ángulo de ataque supera los 10°,

la trayectoria de los vórtices de punta de las aspas varía significativamente entre el plano lateral frontal y el plano lateral sotavento.

En el 2017, Yang *et al.* [30] introdujeron un método denominado proceso de doblado por torsión y laminación cónica (RTB, por sus siglas en inglés) para la fabricación de las aspas metálicas de aerogeneradores tipo ASWT, con el objetivo de conservar las curvaturas de su superficie. El sistema RTB consta de un par de rodillos cónicos y rodillos cilíndricos que permiten el doblado por torsión. Mediante este proceso, pudieron fabricar, instalar y evaluar experimentalmente un prototipo de aerogenerador ASWT, obteniendo una desviación menor al 5% respecto a la forma geométrica diseñada por las aspas.

Por otro lado, Kamal *et al.* [31], estudiaron el uso de diferentes perfiles aerodinámicos en el diseño del rotor. Para ello, analizaron perfiles aerodinámicos pertenecientes a las series FX, S y NACA, evaluando cinco perfiles de cada serie. Los resultados mostraron que los perfiles NACA 4401, FX66-H-60 y S1091 presentaron los mejores desempeños aerodinámicos, siendo el perfil NACA 4401 el más eficiente, con un coeficiente de potencia máximo de 0.3045.

En 2018, Rao *et al.* [32], se enfocaron en el uso de un perfil aerodinámico NACA 6409 para el diseño de un rotor en espiral. Para predecir su diseño aerodinámico, realizaron simulaciones CFD empleando el software ANSYS FLUENT. En el análisis consideraron una velocidad del viento de 1 a 15 m/s en intervalos de 2 m/s. Los resultados mostraron que el uso del perfil permitió incrementar el torque en un 15% a bajas velocidades, lo que sugiere un mejor desempeño en condiciones de viento bajo a moderado.

Ese mismo año Patil [33] diseñó y fabricó un aerogenerador basado en la geometría de la espiral de Fibonacci, incorporando un perfil de aspas cónico espiral. Las simulaciones, realizadas con el software ANSYS CFX, mostraron que la velocidad mínima del viento requerida para iniciar el funcionamiento del aerogenerador era de 5 m/s. El mejor rendimiento se obtuvo para un rango de velocidad del viento entre 18 a 25 m/s.

Por su parte, Herrapstanti *et al.* [34] también exploraron la aplicación de la espiral de Fibonacci, con un enfoque en el efecto de los ángulos de apertura del rotor sobre los coeficientes de sustentación y de arrastre. Sus resultados demostraron que un mayor ángulo de apertura se traduce en un incremento del coeficiente de sustentación. Sin embargo, a diferencia de los aerogeneradores de eje horizontal, el incremento en el coeficiente de arrastre no representa una desventaja crítica en el ASWT, ya que la geometría helicoidal permite aprovechar la fuerza de arrastre para generar rotación.

Jang *et al.* [35] realizaron un estudio numérico y experimental para evaluar el desempeño del aerogenerador tipo ASWT, con el propósito de analizar la discrepancia entre ambas metodologías. El aerogenerador considerado en el estudio presentaba una potencia nominal de 500 W, una velocidad de rotación nominal de 330 RPM, con un rotor de radio de 1.5 m y

una longitud de 1.2 m. A través del análisis numérico, lograron determinar un C_p máximo de 0.293, y comprobaron que la generación de los 500 W era viable a una velocidad del viento de 12.73 m/s. Al comparar estos resultados con los obtenidos en la evaluación experimental, observaron una diferencia máxima del 7.80%, lo cual valida la confiabilidad del modelo numérico empleado.

Diversos autores, como Suntivarakorn *et al.* [28] y Labib *et al.* [36] han evaluado el desempeño aerodinámico de aerogeneradores del tipo ASWT mediante la modificación de la relación de aspecto, definida como la relación entre el diámetro y la longitud (D/L). En sus estudios, analizaron cinco modelos distintos cuyas geometrías presentan relaciones de 1.0, 1.25 y 1.5, con elongaciones tanto hacia atrás como hacia adelante. Estos trabajos se desarrollaron mediante simulaciones numéricas utilizando el software ANSYS CFX, con la finalidad de predecir el rendimiento aerodinámico de las aspas bajo velocidades de viento que varían entre 5 y 12 m/s, con intervalos de 1 m/s.

Los resultados demostraron que con la relación de aspecto de 1.0 con elongación hacia adelante permitió alcanzar un coeficiente de potencia máximo de 0.249 en condiciones de baja velocidad del viento. A partir de estos hallazgos, los autores recomendaron no reducir la relación de aspecto por debajo de 1.0, ya que ello conlleva un aumento en las vibraciones y fluctuaciones, lo cual podría afectar negativamente tanto la eficiencia como la vida útil del aerogenerador.

De manera similar, Krishna [37] realizó un estudio numérico centrado en la relación entre el ángulo de pitch y el radio del rotor. En su análisis, probó distintas configuraciones, empezando con un pitch equivalente al 25% del radio y aumentando en intervalos de 0.25 hasta alcanzar el doble del radio. El autor reportó que un pitch igual a 1.5 veces el radio produjo el mayor valor de C_p , con un máximo de 0.236. Sin embargo, al aumentar aún más la relación, el coeficiente comenzó a disminuir debido a la excesiva elongación del rotor.

Por su parte Sudip *et al.* [38] realizaron un análisis numérico del aerogenerador ASWT, considerando variaciones tanto en la relación del pitch (de 0.25 a 2 veces el radio), como en el ángulo de apertura (30, 45, 60, 75 y 90°), bajo velocidades de viento entre 3.5 m/s a 12 m/s. Concluyeron que la mejor configuración corresponde a una relación de pitch de 1.5 veces el radio y un ángulo de apertura de 60°, lo cual permitió obtener un C_p de 0.25 a un TSR de 1.5, así como potencias generadas de 0.92, 1.38 y 1.98 W a velocidades de 7, 8 y 9 m/s respectivamente.

Como continuación a este trabajo, Bhattarai *et al.* [39] llevaron a cabo una investigación experimental, fabricando un aerogenerador con un diámetro de 150 mm de diámetro mediante impresión 3D. Posteriormente, realizaron pruebas en un túnel de viento con velocidades de entre 0 y 9 m/s. Los resultados mostraron que, a velocidades de 7, 8 y 9 m/s, la potencia generada fue de 0.45, 0.73 y 0.95 W, respectivamente.

Otra línea de investigación orientada a evaluar el desempeño aerodinámico de aerogeneradores ASWT se ha centrado en la variación de los ángulos de sus aspas. Nawar *et al.* [40] realizaron análisis numéricos y experimentales con el fin de comparar el rendimiento de aerogeneradores configurados con ángulos variables (es decir, diferentes ángulos para cada aspa) frente a aquellos con ángulos fijos (ángulos iguales de todas las aspas).

Los experimentos se realizaron en un túnel de viento de prueba abierta, donde se controló la velocidad del viento en un rango de 6 a 12 m/s, con una velocidad de corte mínima de 2.5 m/s. Para las simulaciones numéricas se utilizó el software ANSYS FLUENT. Los resultados obtenidos permitieron concluir que los rotores con ángulos variables presentan una mayor capacidad para capturar energía del viento en comparación con el rotor de ángulos fijos. En particular, el rotor con ángulos variables alcanzó un coeficiente de potencia máximo del 22.6%, lo que representa una mejora del 14.7% respecto a la configuración de ángulos fijos.

De manera similar, Song *et al.* [1], diseñaron cinco rotores ASWT con diferentes configuraciones de ángulo de aspa, los cuales fueron evaluados mediante simulaciones numéricas y pruebas experimentales, con el objetivo de analizar tanto el rendimiento aerodinámico como las características de la estela generada por los aerogeneradores. Los resultados mostraron que un rotor con una configuración con los ángulos de aspa variables permite que el flujo de aire atraviese las aspas con menor perturbación, lo que mejora la eficiencia global del sistema. Asimismo, los autores concluyeron que la recuperación de la estela en los rotores con ángulos de aspa pequeños es inferior a la obtenida con ángulos más grandes. En particular, la configuración de ángulos variables (30-45-60°) presentó el mejor desempeño, alcanzando un coeficiente de potencia de 0.235, valor superior al obtenido con configuraciones de ángulos de aspa fijos.

Adicionalmente, Kamal *et al.* [41], realizaron un estudio experimental y numérico centrado en la variación de los ángulos de las aspas y el efecto del espesor sobre el rendimiento aerodinámico de aerogeneradores ASWT. El estudio experimental se realizó utilizando un modelo de referencia con un espesor de aspa de 3.5 mm y ángulos de aspa de 30°, 45° y 60° para sus tres aspas, respectivamente. En el análisis, el espesor de las aspas fue modificado en un rango de 1.0 a 3.5 mm con incrementos de 0.5 mm. En cuanto a los ángulos, se variaron individualmente por aspa: para la primera, se evaluaron ángulos de 20, 25, 30 y 35°, para la segunda, ángulos de 40, 45, 50 y 55°, y para la tercera, se consideraron tres valores: 55, 60 y 65°. Los resultados permitieron identificar que la configuración óptima corresponde a ángulos de 25, 50 y 60° para la primera, segunda y tercera aspa, respectivamente, con un espesor de 2 mm. Esta configuración alcanzó un coeficiente de potencia de 0.286, lo que representa una mejora del 17.7% respecto al modelo de referencia.

En los aerogeneradores tipo ASWT, la geometría en espiral del rotor representa un caso particular de estudio, donde se han explorado diversas formas inspiradas en espirales presentes en la naturaleza. En este contexto, Abdelghafar *et al.* [42] centraron su

investigación en identificar una configuración geométrica óptima con forma de concha de marina para el rotor cónico-espiral de un aerogenerador ASWT, con el objetivo de maximizar la potencia de salida.

El estudio consideró tres parámetros geométricos clave: el ángulo máximo de rotación de la espiral, el estiramiento inicial de la espiral y el ángulo de apertura de la espiral. En particular, se enfocaron en optimizar este último parámetro con el fin maximizar el coeficiente de potencia (C_p) y minimizar el coeficiente de empuje (C_t). Para ello, emplearon el algoritmo NSG-II (*Non-dominated Sorting Genetic*) en combinación con simulaciones numéricas basadas en la dinámica de fluidos computacional (CFD). Las variables de diseño que mostraron una mayor sensibilidad a la producción de potencia y en el empuje axial fueron el ángulo de apertura de la espiral y su estiramiento inicial. Los resultados indicaron que es favorable reducir el ángulo máximo de rotación e incrementar tanto el estiramiento inicial como el ángulo de apertura. Bajo estas condiciones, se obtuvo un coeficiente de potencia de 0.305, lo que representa una mejora del 14% en comparación con el aerogenerador de referencia. Asimismo, se logró una reducción del 9.6% en el coeficiente de empuje, alcanzando un C_t de 0.719.

Hamid *et al.* [43] evaluaron dos tipos de perfiles en el espiral en el diseño del aerogenerador: el perfil logarítmico y el de Arquímedes, realizando variaciones en los ángulos de apertura. El análisis de desempeño y las características aerodinámicas de ambos perfiles se llevó a cabo mediante simulaciones numéricas usando el software ANSYS FLUENT. Para cada tipo de espiral, el ángulo de apertura se varió entre 40 y 90°, en incrementos de 10°. Los resultados mostraron que el perfil de espiral de Arquímedes presentó un mejor desempeño aerodinámico en comparación con el perfil logarítmico. El mayor coeficiente de potencia obtenido con el perfil de Arquímedes fue de 0.2683, correspondiente a un ángulo de apertura de 60°.

Debido a que el uso del aerogenerador está orientado a entornos urbanos, se han propuestos diversas configuraciones que incorporan un concentrador, con el objetivo de aumentar las bajas velocidades del viento típicas de este tipo de ambiente. En 2021, Refaie *et al.* [44] integraron un concentrador al diseño del aerogenerador ASWT. La geometría empleada consistía de tres aspas con un diámetro de 250 mm y un espesor en las aspas de 3 mm, configuradas con ángulos variables.

Respecto al concentrador, se evaluaron distintas configuraciones considerando los siguientes parámetros: la posición del concentrador medida desde la punta de la tercera aspa, la longitud del concentrador en relación con el diámetro del rotor, el ángulo del concentrador, y la holgura entre la punta del rotor y el concentrador. Los resultados del análisis numérico indicaron que el coeficiente de potencia máximo alcanzado fue de 0.311, lo que presenta un aumento del 33.48% en comparación con el aerogenerador ASWT sin concentrador. Este valor se obtuvo con una configuración que incluía una posición del concentrador a 0.1 veces

el diámetro del rotor, una longitud del concentrador de 0.6 del diámetro del rotor, un ángulo de 20° y una holgura en la punta del rotor de 0.05 el diámetro del mismo.

En 2023, Hameed *et al.* [45] diseñaron una cubierta con una brida en la entrada del aerogenerador con el objetivo de maximizar el coeficiente de potencia (C_p). Para la optimización del diseño, emplearon un algoritmo evolutivo basado en Kriging. La finalidad de la cubierta fue acelerar el flujo de viento no distribuido que atraviesa el plano del rotor, dado que la potencia de salida varía proporcionalmente con la velocidad del viento. Las variables de diseño consideradas incluyeron los radios y longitudes de las secciones convergentes y divergentes (R1, L1, R2 y L2, respectivamente), así como la altura de la brida.

Los resultados mostraron un valor máximo de C_p de 0.5025, lo que representa un incremento de 2.58 veces respecto al aerogenerador ASWT sin cubierta ($C_p = 0.195$). Este valor se alcanzó con los siguientes parámetros de diseño: L1=180 mm, L2=152 mm, R1=250 mm y una altura de la brida $h=75$ mm.

Posteriormente, los autores evaluaron una configuración tipo *Wind Lens* con el propósito de incrementar la eficiencia del aerogenerador ASWT y mejorar el comportamiento del flujo a través del rotor. En este estudio, analizaron parámetros como la longitud y ángulo del difusor, longitud del conducto, la altura de la brida, así como las dimensiones y posición del concentrador. Las variables modificadas incluyeron: la longitud del concentrador, el ángulo del concentrador, la holgura entre la punta del aspa y el diámetro del rotor, la posición del concentrador, el radio del rotor, la altura de la brida, la longitud del conducto, longitud del difusor y el ángulo del difusor.

La mejor configuración del concentrador se logró con un diámetro de $D = 250$ mm, y los siguientes valores de diseño: longitud del concentrador de $0.6D$, ángulo del concentrador de 20°, holgura de la punta del aspa $0.05D$ y posición del concentrador de $0.1D$. Asimismo, la altura de la brida, la longitud del conducto y la longitud del difusor fueron establecidas en $0.3D$. Con esta configuración, se alcanzó un coeficiente de potencia C_p de 0.49, es decir, un valor 2.1 superior al obtenido con un aerogenerador sin la configuración de *Wind Lens* [46].

En 2023, Arzuaga *et al.* [47] llevaron a cabo una caracterización experimental del aerogenerador de aspas helicoidales Ayanz, evaluando su desempeño tanto en configuración libre como encapsulado en un tubo. Para este estudio, se consideró el aerogenerador ASWT como una variante del aerogenerador de aspas helicoidales. Se analizaron dos morfologías: una con un tubo envolvente y la otra sin tubo.

El prototipo analizado consta de tres aspas helicoidales conectadas entre sí con un desfase geométrico de 120°. Las aspas presentan un espesor aproximado de 5 mm, una relación diámetro-longitud del 80% y un peso total de 60 kg. En las pruebas experimentales, el aerogenerador sin tubo alcanzó un coeficiente de potencia de 0.15 a una velocidad de 6.59 m/s, mientras que, con el tubo, obtuvieron un C_p de 0.29 con una velocidad del viento del

viento de 6.24 m/s. Los autores concluyeron que el uso del tubo genera un incremento significativo en el desempeño del aerogenerador, con una mejora estimada entre el 70 y 90% en la potencia generada.

El mismo año, Salim *et al.* [48] realizaron un análisis numérico de un aerogenerador tipo ASWT con el objetivo de evaluar diferentes materiales para su fabricación, mediante un estudio de cargas estáticas y dinámicas. El análisis se centró en determinar las deformaciones y esfuerzos máximos generados en cada caso, con el fin de identificar el material más adecuado para el diseño estructural del aerogenerador. Los resultados indicaron que los materiales compuestos, en particular la fibra de carbono y la aleación de aluminio, presentan un mejor desempeño en comparación con materiales convencionales como el acero. Los aerogeneradores ASWT fabricados con materiales compuestos mostraron una mayor capacidad para operar a mayores velocidades, además de experimentar menores deformaciones mecánicas bajo carga.

Utilizando el mismo principio de un aerogenerador helicoidal, se evaluó una nueva configuración en forma de caparazón. En la Figura 2.8, se muestra el diseño de este aerogenerador, el cual fue realizado en AutoCAD Fusion 360. El caparazón presenta un diámetro de 400 mm y una longitud de 850 mm, e integra dos aspas conectadas entre sí con un ángulo de 180°, cubriendo parcialmente la estructura del caparazón. Para predecir su desempeño mecánico, realizaron simulaciones numéricas mediante CFD utilizando el software ANSYS FLUENT. El análisis incluyó variables como torque, potencia, distribución de presión y fuerza de arrastre. Las condiciones de operación consideradas fueron velocidades del viento de 1, 4, 9 y 15 m/s, una velocidad angular de 100 rpm y presión atmosférica estándar. Los resultados indicaron que esta configuración tipo caparazón incrementa el torque generado a bajas velocidades del viento, logrando hasta un 15% más en comparación con un aerogenerador tipo ASWT convencional [49].



Figura 2.8. Diseño de aerogenerador en espiral tipo caparazón [49].

2.5. Conclusiones del estado del arte

Las aportaciones identificadas en las investigaciones y artículos revisados sobre aerogeneradores de diseño en espiral se sintetizan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Resumen de investigaciones realizadas respecto a los aerogeneradores en espiral.

Modificación	Aporte	C_p	Tipo análisis	Método	Software
Análisis del impacto en el torque de la turbina según el número de aspas [28].	La configuración de tres aspas mostró la mayor capacidad de torque.	N/A	Análisis experimental.	Análisis en laboratorio en ambiente controlado.	SolidWorks.
Efecto de la dirección del viento para los planos de 0 a 15° [29].	Ángulo de ataque menor a 10°.	N/A	Análisis experimental.	Método de velocimetría de imagen de partículas (PIV) Método 2D PIV	N/A
Introducción de un perfil aerodinámico a un aerogenerador en espiral de Arquímedes para comparar el torque contra un ASWT convencional [32].	Usando el perfil aerodinámico NACA 6409 016 se incrementó el torque un 15%.	N/A	Análisis numérico.	Simulaciones CFD.	ANSYS FLUENT.
Diseño de aerogenerador con ayuda de la espiral de Fibonacci [33].	Se encontró una máxima eficiencia teórica del 71.38%.	N/A	Análisis numérico y experimental.	Simulaciones CFD Método PIV.	ANSYS FLUENT.
Efecto de la relación de aspecto [36].	Mejor relación de aspecto (L/D) = 1.0, menor a eso puede producir más vibraciones y fluctuaciones.	0.249	Análisis numérico.	Simulaciones CFD	ANSYS-CFX 19.
Desempeño aerodinámico considerando la variación de los ángulos de aspas [1].	La configuración que mayor C_p produjo fue la de 30-45-60°.	0.234	Análisis numérico.	Volumen finito	ANSYS FLUENT.
Efecto del espesor y ángulo del aspa en el desempeño aerodinámico [41].	La configuración de ángulos 25-50-60° y 2 mm de espesor en las aspas fue la que presentó el mejor desempeño.	0.286	Análisis numérico y experimental.	Resolución ecuaciones de RANS y enfoque de volumen finito. Pruebas en túnel de viento, sensor de velocidad LM393, microcontrolador.	ANSYS FLUENT.
Parámetro geométrico en forma de concha de mar para la forma cónica espiral [42].	Reducir el ángulo máximo de rotación y aumentar el estiramiento inicial y el ángulo de apertura.	0.305	Análisis numérico.	Simulaciones CFD.	Simcenter Star-CCM+ 2020.1.

Comparación de la espiral logarítmica contra la de Arquímedes [43].	El perfil de Arquímedes demostró un mejor desempeño.	0.268	Análisis numérico.	Simulaciones CFD.	ANSYS FLUENT.
Uso de un concentrador [44].	La mejor posición del concentrador es de $0.1D$ a partir de la última aspa (del diámetro del rotor) con ángulo de 20° , longitud $0.6D$, holgura entre el concentrador y punta del aspa de $0.05D$.	0.311	Análisis numérico.	Simulaciones CFD	ANSYS FLUENT.
Adición de un concentrador con una brida [45].	Los mejores valores de radio y longitud de las secciones convergentes y divergentes $R1$, $L1$, $R2$ y $L2$ fueron: $L1=180$ mm, $L2=152$ mm, $R1=250$ mm y $h=75$ mm.	0.502	Análisis numérico.	Uso de un optimizador basado en un algoritmo evolutivo de Kriging. RANS mediante un enfoque MRF.	ANSYS FLUENT.
Adición de un dispositivo Wind-Lens [46].	La mejor configuración del concentrador fue con un valor $D = 250$ mm, $0.6D$ para la longitud, 20° en el ángulo del concentrador, $0.05D$ en la holgura de la punta del aspa y $0.1D$ para la posición del concentrador para los valores de la altura de la brida la longitud del conducto y longitud del difusor fue de $0.3D$.	0.49	Análisis numérico.	Simulaciones CFD.	ANSYS FLUENT.

Como se ha evidenciado en la literatura, existe un interés creciente en el desarrollo de tecnologías emergentes, como los aerogeneradores tipo ASWT, cuyo objetivo es aprovechar de manera más eficiente el recurso eólico en entornos urbanos, caracterizados por velocidades de viento bajas e inestables. Este interés ha motivado la exploración de diversas configuraciones y estrategias de diseño orientadas a superar los desafíos particulares de estos entornos, tales como la turbulencia, la interferencia generada por edificaciones y la limitación de espacio disponible.

Los estudios revisados comprenden una amplia gama de enfoques, que van desde marcos teóricos y modelos computacionales hasta desarrollos experimentales. En conjunto, estos trabajos evidencian avances significativos en el desempeño aerodinámico y la confiabilidad operativa de estos dispositivos. Dichos esfuerzos posicionan a los ASWT como una alternativa prometedora en el ámbito de la energía eólica de baja potencia, con el potencial de transformar la manera en que se genera la electricidad en entornos urbanos.

2.6. Definición del problema

El crecimiento sostenido de la demanda de energías limpias en los últimos años está estrechamente relacionado con el aumento de la población, ya que este fenómeno conlleva una mayor necesidad de generar electricidad, especialmente en entornos urbanos. Si bien la energía eólica representa una fuente renovable con múltiples beneficios, su aprovechamiento a gran escala dentro de las ciudades resulta limitado. No obstante, en los entornos urbanos persiste un flujo de viento que, aunque de menor intensidad y calidad, constituye un recurso eólico potencialmente aprovechable para la generación de energía eléctrica.

El problema recae en las dificultades o retos que tiene un entorno urbano referente al comportamiento del viento, por sus bajas velocidades y flujo turbulento, lo que es un problema para los aerogeneradores convencionales de tres aspas, además de no contar con el espacio disponible para instalar un aerogenerador de gran tamaño.

Por lo anterior, surge el interés de diseñar nuevos tipos de aerogeneradores capaces de contrarrestar los retos que se encuentran en un entorno urbano. Por esta razón, en el presente proyecto se propone diseñar un aerogenerador de eje horizontal con una configuración alterna. La propuesta consiste en utilizar la caracterización del viento en una zona urbana para diseñar un rotor en espiral con un nuevo diseño aerodinámico capaz de aprovechar las fluctuaciones y bajas velocidades del viento que existen en la zona caracterizada, y, además, compacto para ser usado en espacios reducidos.

2.7. Hipótesis

El aerogenerador tipo ASWT propuesto está diseñado para minimizar los efectos de las fluctuaciones del viento características de los entornos urbanos, gracias a la robustez estructural de su rotor. Asimismo, se espera que presente un rango de operación más amplio, lo que le permita aprovechar de manera más eficiente las bajas velocidades del viento predominantes en estas zonas.

2.8. Objetivo General

Desarrollar el diseño aerodinámico de un aerogenerador tipo ASWT de baja potencia para la generación de energía eléctrica distribuida en entornos urbanos.

2.8.1 Objetivos específicos

- Proponer y evaluar diferentes configuraciones geométricas y topológicas de aerogeneradores tipo ASWT de baja potencia para esquemas de generación de energía verde distribuida en entornos urbanos.
- Caracterizar el comportamiento del viento en el entorno urbano seleccionado.
- Definir los parámetros de diseño necesarios para el desarrollo del aerogenerador.
- Proponer el diseño conceptual del aerogenerador ASWT.
- Realizar el diseño geométrico del aerogenerador mediante herramientas de Diseño Asistido por Computadora (CAD).

- Verificar la metodología de diseño propuesta, a través del análisis de un caso de estudio reportado en la literatura.
- Realizar el análisis paramétrico del aerogenerador propuesto utilizando técnicas numérico-computacionales tales como Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD) y el Método de Elemento Finito (FEM).
- Manufacturar y ensamblar un prototipo de micro aerogenerador tipo ASWT.

2.9. Justificación del problema

La energía eólica constituye una fuente de energía verde que puede aprovecharse tanto a gran escala en parques eólicos como a pequeña escala en entornos urbanos. Estos últimos representan zonas con potencial para explorar el recurso eólico disponible y generar electricidad dentro de las ciudades o grandes urbes. Por ello, resulta fundamental desarrollar aerogeneradores que superen las limitaciones propias del aprovechamiento eólico en contextos urbanos. El presente proyecto tiene como objetivo impulsar esta tecnología para la generación distribuida de energía verde a pequeña escala, contribuyendo así a la sostenibilidad energética en áreas urbanas.

2.10. Alcances y limitaciones

Limitaciones:

El proyecto se enfoca en la realización de estudios numéricos mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), análisis estructurales utilizando el Método de Elemento Finito (FEM), así como una evaluación experimental inicial del modelo propuesto de un aerogenerador tipo ASWT de pequeña escala.

Alcances:

- Diseño aerodinámico de un aerogenerador ASWT de baja potencia, adaptado para su funcionamiento en entornos urbanos.
- Caracterización del comportamiento del viento en un entorno urbano específico, para fundamentar el diseño.
- Diseño y construcción de un prototipo funcional de un micro aerogenerador tipo ASWT.

3 Marco Teórico

3.1. Energía eólica

El viento es una consecuencia de la radiación solar. Las diferencias de insolación entre los distintos puntos de la tierra generan diferentes áreas térmicas y los desequilibrios de temperatura provocan diferencias de densidad en las masas de aire, que se traduce en variaciones de presión.

Se ha calculado que aproximadamente el 2% de la energía solar que llega a la tierra se convierte en energía eólica y que un 35% de esta se disipa en la zona inferior de la atmósfera, de un kilómetro de altura [50].

La energía eólica, tiene su uso más antiguo documentado como medio de locomoción. Existen dibujos egipcios, de 5,000 años de antigüedad, que muestran naves con velas para trasladarse por el río Nilo. Las primeras referencias históricas sobre una posible aplicación de la energía eólica fuera de la navegación, data del año 1,700 a.C., siendo los babilonios los pioneros en utilizar molinos de viento.

En los últimos 40 años, el viento ha comenzado a aprovecharse a gran escala para la generación de energía eléctrica, en función de las crisis petroleras y energéticas del mundo. La tecnología está afianzada pero los diseños siguen en desarrollo.

Dentro de las principales ventajas de la energía eólica se pueden encontrar:

- Reduce emisiones de CO₂.
- No modifican suelos, ni contaminación de acuíferos por vertidos.
- No utiliza recursos escasos (no renovables).
- Al finalizar la vida útil de los aerogeneradores, su desmantelamiento no deja huella en el ambiente.



Figura 3.1 Ejemplificación del uso de la energía eólica [51].

3.2. Aerogeneradores

Un aerogenerador, así como se describe en distintas fuentes, es una máquina que convierte la energía del viento en electricidad. Como generadores de electricidad, los aerogeneradores están conectados a alguna red eléctrica. Estas redes incluyen: circuitos de carga de baterías, sistemas de energía a escala residencial, redes aisladas o insulares, o grandes redes de servicio público.

Los aerogeneradores que se encuentran con más frecuencia son de pequeña capacidad, del orden de 10 KW o menos. En términos de capacidad de generación total, los aerogeneradores constituyen la mayor parte de la capacidad instalada mundial están en el rango de 1.5 a 5 MW. Los de mayor capacidad se utilizan principalmente en grandes redes de servicios públicos.

3.2.1 Funcionamiento de un aerogenerador

En los aerogeneradores modernos de tres aspas, el proceso de conversión real utiliza la fuerza aerodinámica básica de sustentación para producir un par neto positivo en un eje giratorio, lo que da como resultado primero la producción de energía mecánica y luego su transformación en electricidad mediante un generador eléctrico. Los aerogeneradores pueden producir energía sólo en respuesta al recurso que está inmediatamente disponible. No es posible almacenar el viento y usarlo después.

A pesar de existir dos tipos básicos de aerogeneradores (eje horizontal y eje vertical) su principio de operación es esencialmente el mismo. La captación de la energía eólica se realiza mediante la acción del viento sobre las aspas, las cuales están unidas al eje. El principio aerodinámico, por el cual este conjunto gira, es similar al que hace que los aviones vuelen.

La aerodinámica es el estudio del movimiento del aire y sus efectos físicos sobre los cuerpos que se mueven a través de él para que esta resistencia sea menor. Se requiere que sea de forma aerodinámica, es decir, entre menos superficies planas que estén actuando de forma perpendicular al sentido del flujo del aire, menor será la resistencia [52].

El aire, es obligado a fluir por las caras superior e inferior de una placa o perfil, generando una diferencia de presiones entre ambas caras, lo cual da origen a una fuerza resultante que actúa sobre el perfil. Descomponiendo esta fuerza en dos direcciones, las cuales se muestran gráficamente en la Figura 3.2:

- Fuerza de sustentación, de dirección perpendicular al viento.
- Fuerza de arrastre, de dirección paralela al viento.

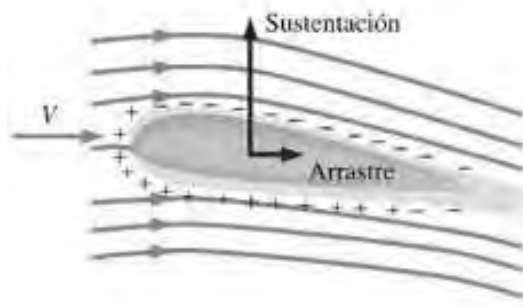


Figura 3.2 Fuerzas de sustentación y de arrastre [53].

El viento impulsa el rotor gracias a sus aspas. Esta energía mecánica se transmite al eje, el cual a su vez acciona un alternador o generador eléctrico para convertir la energía mecánica de rotación en energía eléctrica.

Para favorecer la circulación del aire sobre la superficie de las aspas, se debe evitar la formación de torbellinos y maximizar la diferencia de presiones. Según como estén situadas las aspas con respecto del viento y al eje de rotación, la fuerza que producirá el par motor será dominante la fuerza de arrastre o la de sustentación [54].

3.2.2 Clasificación de los aerogeneradores

Un aerogenerador se puede clasificar según su eje de rotación, capacidad de potencia, diámetro del rotor, principio aerodinámico (ya sea de sustentación o de arrastre) y su potencia nominal (kW). En la Figura 3.3, se muestra un gráfico de las diferentes clasificaciones de los aerogeneradores.

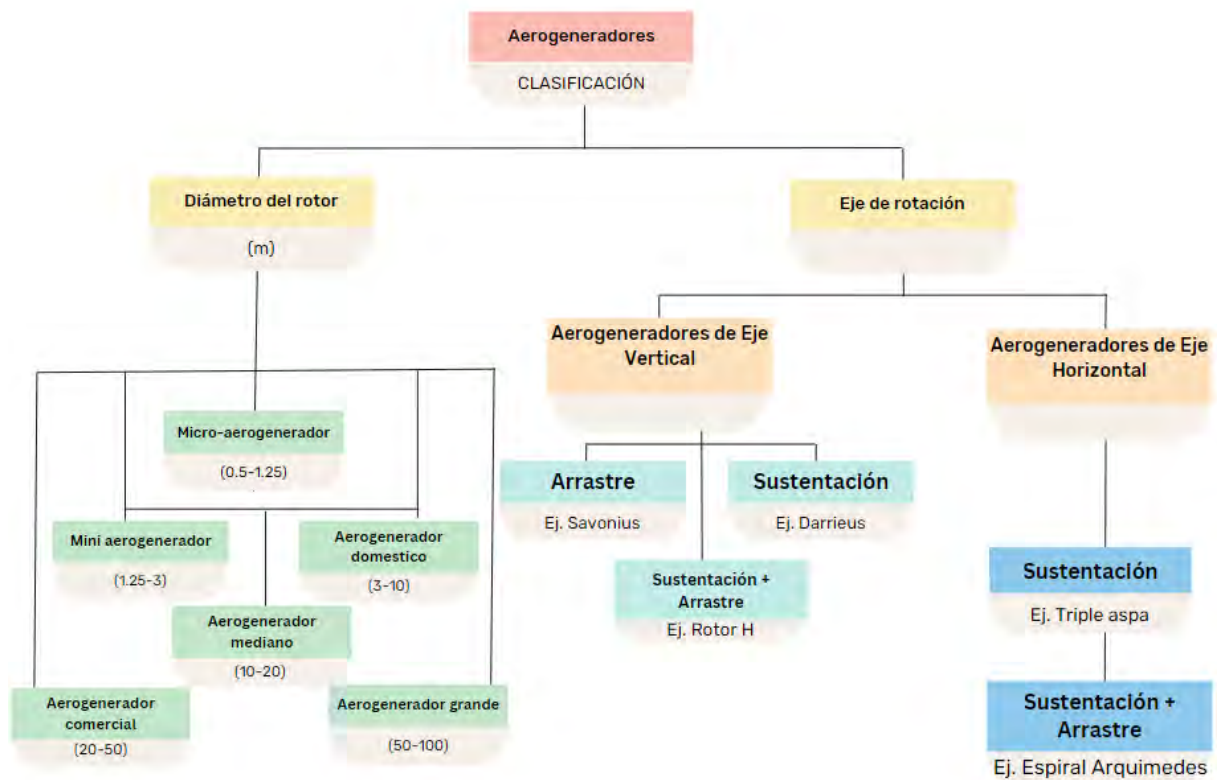


Figura 3.3. Clasificación de aerogeneradores [elaboración propia].

Lo más común es clasificar los aerogeneradores según la posición del eje de rotación con respecto a la dirección del viento en: Aerogeneradores de Eje Horizontal (HAWT) y Aerogeneradores de Eje Vertical (VAWT).

La mayoría de los aerogeneradores HAWT son de dos o tres aspas. La función principal del rotor es transformar el movimiento lineal del viento en movimiento giratorio para impulsar un aerogenerador. Debido a que las aspas de un aerogenerador están obligadas a moverse en un plano con el cubo como centro, la fuerza de sustentación induce la rotación alrededor del cubo. Además de la fuerza de sustentación, una fuerza de arrastre perpendicular a la fuerza de sustentación bloquea la rotación del rotor.

En el caso de los aerogeneradores VAWT, los componentes principales se colocan en la base del aerogenerador. La caja de cambios y generadores de energía están ubicados muy cerca del suelo. Estos aerogeneradores, no necesitan apuntar en la dirección del viento, por lo que el mecanismo de detección del viento no es necesario para ellos. Según las fuerzas aerodinámicas, los VAWT se pueden clasificar en dos formas. Una es de tipo arrastre; otra es de sustentación. Los aerogeneradores VAWT tipo Savonius son el ejemplo clásico de los de tipo arrastre. Las aspas experimentan mucha fuerza de arrastre cuando funcionan con el viento. Este diferencial de fuerza de arrastre ayuda a que gire. Los de tipo arrastre aprovechan

menos energía eólica que los de tipo sustentación. Los aerogeneradores VAWT de tipo sustentación más comunes son el tipo Darrieus, que poseen un coeficiente de potencia más alto y un principio de funcionamiento comparativo simple. Sin embargo, su par de arranque es bajo, por lo tanto, necesitan una fuente de energía externa o arrancador para comenzar a girar.

3.2.3 Teoría de momento unidimensional y límite de Betz

El análisis clásico de un aerogenerador fue desarrollado originalmente por Betz y Glauert en la década de 1930. La teoría del momento y la teoría de los elementos del aspa se combinan en una teoría que permite calcular las características del rendimiento de una sección anular del rotor.

Se puede utilizar un modelo simple atribuido a Betz, para determinar la potencia de un rotor de una turbina ideal, el empuje del viento sobre el rotor ideal y el efecto de la operación del rotor en el campo eólico local. Es un modelo basado en la teoría del momento lineal desarrollada hace más de 100 años para predecir el rendimiento de las hélices de los barcos. El análisis supone un volumen de control, en el que sus límites del volumen de control son la superficie de un tubo de flujo y dos secciones transversales, tal y como se ilustra en la Figura 3.4.

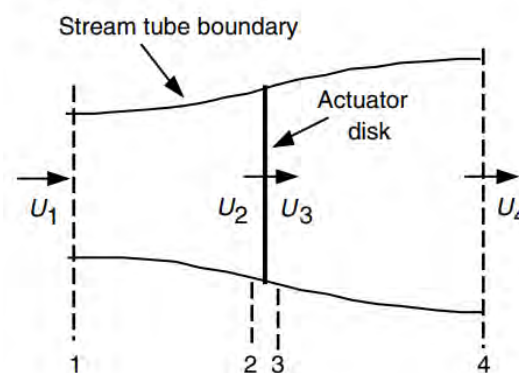


Figura 3.4: Modelo de disco actuador de una turbina eólica; U , velocidad media del viento; 1, 2, 3 y 4 indican ubicaciones [55].

El único flujo se realiza a través de los extremos del tubo de corriente. La turbina está representada por un “disco actuador” uniforme que crea una discontinuidad de presión en el tubo de corriente de aire que fluye a través de ella. Este análisis no se limita a algún tipo particular de turbina eólica. Dicho análisis asume los siguientes puntos [55]:

- Flujo de fluido homogéneo, incompresible, y en estado estacionario.
- Sin arrastre por fricción.
- Un número infinito de aspas.

- Empuje uniforme sobre el disco o el área del rotor.
- Una estela no rotativa.
- La presión estática aguas arriba y aguas abajo del rotor es igual a la presión estática ambiental no perturbada.

Aplicando la teoría de conservación del momento lineal al volumen de control que encierra todo el sistema, se puede encontrar la fuerza neta sobre el contenido del volumen de control. Esa fuerza es igual y opuesta al empuje, T , que es la fuerza del viento sobre la turbina eólica. A partir de la conservación del momento lineal para un flujo unidimensional, incompresible e invariante en el tiempo, el empuje es igual y opuesto a la tasa de cambio del momento de la corriente de aire:

$$T = U_1(\rho AU)_1 - U_4(\rho AU)_4 \quad (3.1)$$

Donde ρ es la densidad del aire, A es el área de la sección transversal, U es la velocidad del aire y los subíndices indican valores en secciones transversales numeradas en la Figura 3.4.

Para el flujo de estado estacionario, $(\rho AU)_1 = (\rho AU)_4 = \dot{m}$, donde $\dot{m}$ es la tasa de flujo de masa. Por lo tanto:

$$T = \dot{m}(U_1 - U_4) \quad (3.2)$$

El empuje es positivo, por lo que la velocidad detrás del rotor, U_4 , es menor que la velocidad de la corriente libre, U_1 . De este modo, la función de Bernoulli se puede utilizar en los dos volúmenes de control a ambos lados del disco actuador. En el tubo de corriente aguas arriba del disco:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2 \quad (3.3)$$

En el tubo de corriente aguas abajo del disco:

$$p_3 + \frac{1}{2}\rho U_3^2 = p_4 + \frac{1}{2}\rho U_4^2 \quad (3.4)$$

Donde se supone que las presiones aguas arriba y aguas abajo son iguales ($p_1 = p_4$) y que la velocidad a través del disco sigue siendo la misma ($U_2 = U_3$)

El empuje también se puede expresar como la suma neta de las fuerzas a cada lado del disco actuador.

$$T = A_2(p_2 - p_3) \quad (3.5)$$

Si se resuelve para $(p_2 - p_3)$ usando las Ecuaciones (3.3) y (3.4) y sustituyendo en la Ec. (3.5), se obtiene:

$$T = \frac{1}{2}\rho A_2(U_1^2 - U_4^2) \quad (3.6)$$

La potencia de salida, P , es igual al empuje por la velocidad en el disco:

$$P = \frac{1}{2}\rho A_2(U_1^2 - U_4^2)U_2 = \frac{1}{2}\rho A_2U_2(U_1 - U_4)(U_1 + U_4) \quad (3.7)$$

Misma que, con base en varios análisis y consideraciones se reduce a la Ec. (3.8) donde a representa el coeficiente de inducción axial:

$$P = \frac{1}{2}\rho AU^3 4a(1 - a)^2 \quad (3.8)$$

El rendimiento del rotor de un aerogenerador suele caracterizarse por su coeficiente de potencia, C_p :

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U^3 A} = \frac{\text{Potencia del Rotor}}{\text{Potencia en el viento}} \quad (3.9)$$

El coeficiente de potencia adimensional representa la fracción de la potencia del viento que es extraído por el rotor. De la Ec. (3.9), el coeficiente de potencia es:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (3.10)$$

El C_p máximo es determinado tomando la derivada del coeficiente de potencia (Ec. (3.10)) con respecto de a y haciendo igual a cero, resultado $a = \frac{1}{3}$. De este modo:

$$C_{p_{max}} = \frac{16}{27} = 0.5926 \quad (3.11)$$

De manera similar a la potencia, el empuje en una turbina eólica se puede caracterizar mediante un coeficiente de empuje adimensional:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} = \frac{\text{Fuerza de empuje}}{\text{Fuerza dinámica}} \quad (3.12)$$

De la Ecuación anterior, se indica que el coeficiente de empuje para una turbina eólica ideal es igual a $4a(1-a)$. C_T con un valor máximo de 1 cuando $a=0.5$ y la velocidad aguas abajo es cero. A la máxima potencia de salida $a = \frac{1}{3}$, C_T tiene un valor de $\frac{8}{9}$. En la Figura 3.5 se visualiza un gráfico de los coeficientes de potencia y empuje para una turbina Betz ideal y la velocidad del viento aguas abajo no dimensionada.

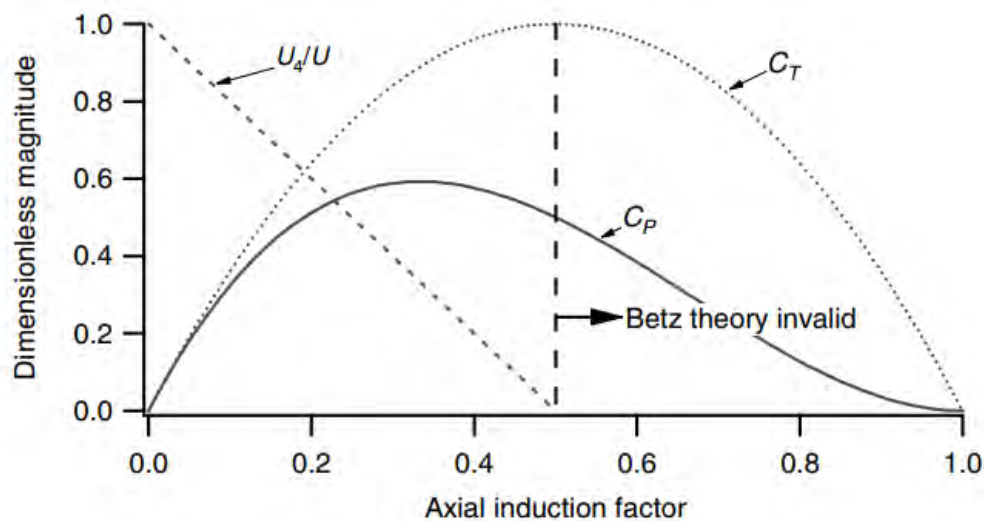


Figura 3.5 Parámetros de funcionamiento de una turbina Betz; U , velocidad del aire no perturbado; U_4 , velocidad del aire detrás del rotor; C_p , coeficiente de potencia; C_T , coeficiente de empuje [55].

Este modelo idealizado no es válido para factores de inducción axial mayores que 0.5. En la práctica, a medida que el factor de inducción axial se aproxima y supera 0.5, los patrones de flujo que no están representados en este modelo simple dan como resultado coeficientes de empuje que pueden llegar hasta 2.0.

El límite de Betz, $C_{p_{max}} = \frac{16}{27}$, es la potencia de rotor máxima teóricamente posible. En la práctica, tres efectos conducen a una disminución de la potencia máxima alcanzable o eficiente.

- Rotación de la estela detrás del rotor.

- Número finito de aspas y pérdidas de punta asociadas.
- Resistencia aerodinámica distinta de cero.

Se debe tener en cuenta que la eficiencia general de la turbina es una función del coeficiente de potencia del rotor y la eficiencia mecánica (incluida la eléctrica) de la turbina eólica:

$$\eta_{general} = \frac{P_{salida}}{\frac{1}{2}\rho AU^3} = \eta_{mecánica} C_p \quad (3.13)$$

De este modo:

$$P_{salida} = \frac{1}{2}\rho AU^3(\eta_{mecánica} C_p) \quad (3.14)$$

3.2.4 Aerogeneradores en espiral

Una nueva configuración de aspas de turbina fue adoptada usando espirales, la que puede ser considerada un tercer tipo de aerogenerador, aunque sigue estando dentro de la categoría de aerogeneradores de eje horizontal HAWT.

El concepto básico de estos aerogeneradores está inspirado en los distintos tipos de espirales que se conocen. Dentro de los espirales usados para probar esta nueva configuración de rotor se encuentran:

- Espiral Logarítmica.
- Espiral de Arquímedes.
- Espiral de Fibonacci.

Algunas otras configuraciones han surgido a partir de las geometrías de la naturaleza, como el espiral que se forma en las conchas del mar.



Figura 3.6 Espiral de Fibonacci en una concha de mar [56].

3.2.5 Aerogeneradores en Espiral de Arquímedes (ASWT)

El aerogenerador en espiral que mejores resultados ha demostrado y el cual ha sido motivo de investigación y desarrollo durante los últimos años, es el Aerogenerador en Espiral de Arquímedes ASWT. Esta nueva configuración usa los principios de la espiral de Arquímedes, cuyo patrón es generado por un punto en movimiento que sale de un punto fijo con una velocidad lineal y una velocidad angular constante.

En coordenadas polares (r, θ) , esta espiral puede ser descrita por la siguiente Ecuación general.

$$r = a + b\theta \quad (3.15)$$

Siendo a y b números reales, en donde a da cuenta de la distancia entre el punto M y O en el instante inicial y b controla la distancia entre las espiras en giros sucesivos, como se muestra en la Figura 3.7.

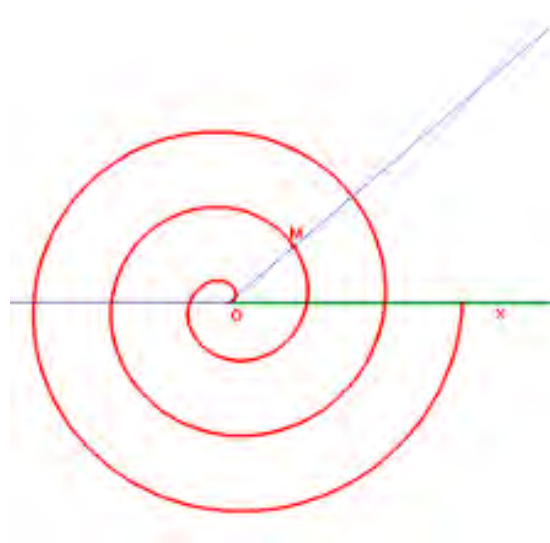


Figura 3.7. Espiral de Arquímedes [57].

El rotor ASWT básico incluye tres aspas helicoidales enrolladas entre sí y un eje horizontal paralelo al suelo. Debido a su trayectoria en espiral, aprovecha la energía del viento mediante el cambio en la dirección del flujo de aire a 90° con respecto a la dirección de ataque del viento y la diferencia de presión existente aguas arriba y aguas abajo. Por lo tanto, el aerogenerador ASWT utiliza tanto las fuerzas de sustentación como las de arrastre para recolectar la energía cinética del viento. La fuerza aerodinámica actuante sobre el rotor ASWT se muestra en la Figura 3.8. El empuje axial (T) inducido por el viento se separa en dos partes. El componente de elevación (T_L) (perpendicular a la sección del aspa) crea esfuerzo y el componente de arrastre (T_D) (paralelo a la sección del aspa) produce energía. Considerando las características del aerogenerador tipo arrastre, el aerogenerador ASWT

puede producir energía a bajas velocidades de viento. Además, puede alinearse con la dirección del viento sin ningún equipo de control electrónico debido a su forma espiral única, siendo así un sistema de control pasivo. Por lo tanto, la demanda de ASWT ha aumentado recientemente, no sólo para aplicaciones urbanas, sino también para sistemas de iluminación rurales.

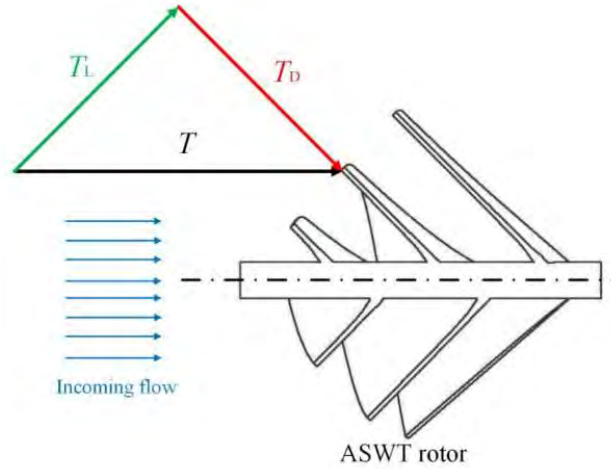


Figura 3.8. Análisis de fuerzas aerodinámicas en el rotor ASWT [1].

Los coeficientes aerodinámicos de un ASWT, incluida la relación de velocidad punta (TSR, por sus siglas en inglés), el coeficiente de potencia (C_p) y el coeficiente de empuje (C_T), se pueden obtener mediante las siguientes Ecuaciones:

$$TSR = \frac{\omega R}{U} = \frac{\pi n R}{30 U} \quad (3.16)$$

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U^3 A} \quad (3.17)$$

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (3.18)$$

Donde P es la potencia de salida (W) del ASWT, T es el empuje del eje, U la velocidad del flujo del viento (m/s), R es el radio del rotor, A es el área de barrido del rotor ASWT ($\pi R^2, m^2$), y n es la velocidad de rotación del rotor ASWT (rpm).

3.3. Capa límite

La capa límite de un fluido es la zona del fluido que se ve perturbada por la presencia de un sólido con el que interactúa o con el que se está en contacto. En la aerodinámica, la capa límite se entiende como aquella en la que la velocidad del fluido respecto al cuerpo varía desde cero hasta el 99% de la velocidad de la corriente no perturbada.

Esta capa límite puede ser laminar o turbulenta, o pueden coexistir en ella zonas de flujo laminar y de flujo turbulento. En el caso de un sólido moviéndose en el interior de un fluido, una capa límite laminar proporciona menor resistencia al movimiento. La capa límite en la zona del borde de ataque o de llegada es de fino espesor. Estas características varían en función de la forma del objeto, entre más aerodinámica sea la superficie del cuerpo, menor será el espesor de la capa límite sobre la superficie.

- Flujo laminar

Es el tipo de movimiento de un fluido cuando es perfectamente ordenado, de manera que se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse si la corriente tiene lugar entre dos planos paralelos.

- Flujo turbulento

Es el movimiento de un fluido que se da de forma caótica, en que las partículas se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas se encuentran formando pequeños remolinos con trayectorias circulares erráticas.

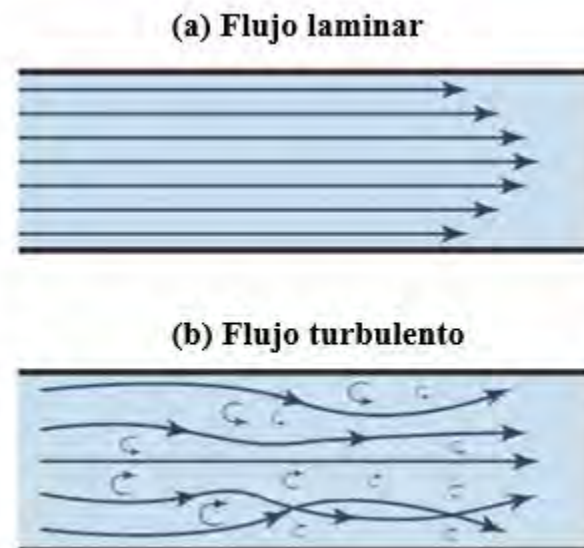


Figura 3.9 (a) Flujo laminar (b) Flujo turbulento [58].

3.3.1 Capa Límite Atmosférica

La capa límite atmosférica (*Atmospheric Boundary Layer*) es la parte más baja de la atmósfera y sus características están directamente influenciadas por el contacto con la superficie terrestre.

Un parámetro en la caracterización del recurso eólico es la variación de la velocidad horizontal del viento con la altura sobre el suelo. La variación de la velocidad del viento con la elevación se denomina perfil vertical de la velocidad del viento. La determinación de este perfil vertical es un parámetro de diseño importante para un aerogenerador porque:

- Determina directamente la productividad de un aerogenerador en una torre de cierta altura.
- Puede influir en la vida útil del rotor del aerogenerador.

3.3.2 Capa Límite Urbana

La Capa Límite Urbana o *Urban Boundary Layer* (UBL, por sus siglas en inglés) es la región, desde el nivel del techo hacia arriba que se ve afectada por la presencia de la zona urbana. La Capa de Cubierta Urbana (UCL, por sus siglas en inglés) puede considerarse como la distancia desde el suelo hasta aproximadamente el nivel del techo. Esto hace que ambas regiones sean importantes desde el punto de vista de la captación de energía eólica.

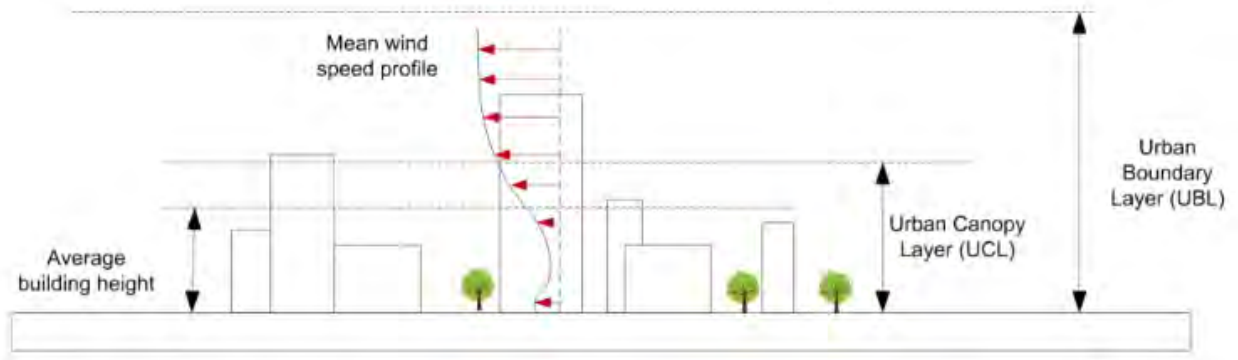


Figura 3.10. Perfil del viento urbano, compuesto por la UBL y la UCL [7].

Una ecuación simple para determinar el perfil de velocidad media del viento para la capa límite atmosférica en condiciones neutralmente estables viene dada por la conocida ley logarítmica de la siguiente manera:

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z-d}{Z_0} \right) \quad (3.19)$$

Donde u_* es la velocidad de fricción en la superficie del suelo, κ es la constante de Von Karman (~ 0.40), z es la altura sobre el suelo, Z_0 es la altura de rugosidad aerodinámica, que va a depender del terreno, y d es el desplazamiento en el plano cero en el que la velocidad

del viento es 0 m/s. Por debajo de esta altura de desplazamiento, el flujo se ve afectado por obstáculos como por ejemplo los edificios.

Las zonas urbanas incluyen estructuras las cuales provocan que el flujo de aire se enfrente a una superficie con gran rugosidad afectando significativamente el perfil del viento. Dado que los edificios obstruyen la trayectoria del flujo en la capa atmosférica inferior, son inevitables los cambios rápidos en la dirección del flujo y la intensidad de la turbulencia.

Como se muestra en la Figura 3.11, el flujo alrededor de una estructura cúbica simple es relativamente complejo, lo que se considera una representación conceptual de un edificio.

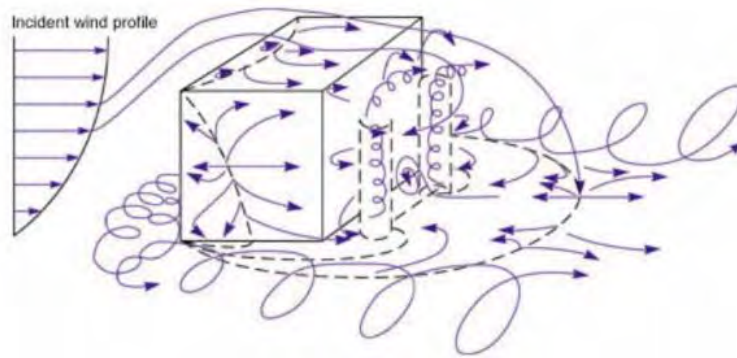


Figura 3.11. Representación conceptual del flujo alrededor de un edificio [7].

Las principales regiones de interés para la energía eólica urbana, son aquellas donde pueda ocurrir la amplificación del flujo. Dichas aceleraciones suelen ocurrir sobre el techo, así como en fachadas laterales (paralelas al flujo del viento). Aunque en zonas muy urbanizadas, los edificios adyacentes podrían impedir tal posibilidad, como se muestra en la Figura 3.12.

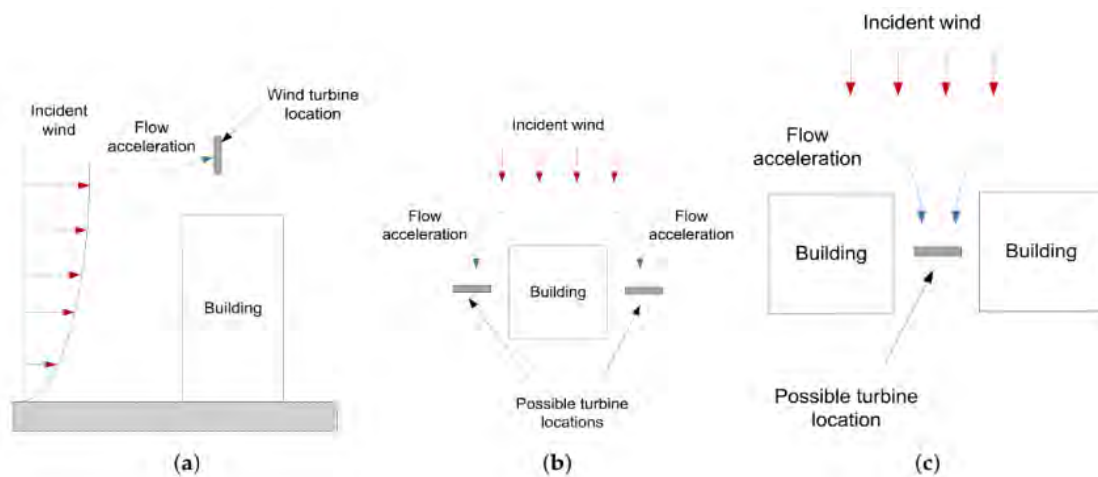


Figura 3.12. Posible colocación de aerogeneradores para aprovechar la aceleración del flujo. (a) En el techo; (b) En fachada lateral; (c) Entre edificios [7].

4 Plan de Trabajo

4.1. Metodología

Para llevar a cabo con éxito esta investigación, se implementó la metodología mostrada en la Figura 4.1, la cual se estructuró en cuatro etapas que guiaron el desarrollo del trabajo y permitieron cumplir con los objetivos planteados:

La metodología se divide en las siguientes etapas:

- I. Se realizaron trabajos de revisión del estado del arte, con el propósito de identificar los estudios existentes sobre los aerogeneradores ASWT y las diversas propuestas presentadas hasta la fecha.
- II. Esta etapa se enfocó en el desarrollo de las siguientes actividades:
 - Caracterización del viento en un entorno urbano.

La caracterización del viento es importante para evaluar el potencial de la energía eólica disponible de la región seleccionada.

Los datos del viento fueron recopilados durante los años 2015 y 2016, a partir de mediciones experimentales realizadas en el edificio de posgrado del Instituto de Energías Renovables (IER) de la Universidad Nacional autónoma de México (UNAM) ubicado en Temixco, Morelos. Las mediciones fueron llevadas a cabo empleando un anemómetro ultrasónico de tres ejes marca Gill Instrumentes que registró la información de velocidad y dirección del viento, así como la temperatura. Posteriormente, los datos fueron analizados y tratados estadísticamente utilizando un código de programación desarrollado en R Studio.

- Definición de los parámetros de diseño.

La definición de los parámetros de diseño del aerogenerador ASWT, fue clave para comprender los cambios factibles de implementar al diseño propuesto del aerogenerador. Esto implicó examinar a detalle las investigaciones previas y el estado del arte de esta área de diseño. Al evaluar diferentes variaciones y combinaciones de parámetros, fue posible identificar las configuraciones más prometedoras y comprender como afectan al funcionamiento del aerogenerador.

- Selección y propuesta del diseño del aerogenerador ASWT.

A partir de la evaluación de los principales factores que influyen en el desempeño de un aerogenerador tipo ASWT, y considerando tanto los parámetros de diseño como la caracterización del recurso eólico, se seleccionó la configuración que mejor se adapta a las condiciones reales de viento en entornos urbanos. Esta selección fundamentó el desarrollo de una nueva propuesta de diseño para el rotor,

orientada a mejorar su eficiencia operativa en condiciones de baja velocidad del viento.

- Desarrollo del modelo geométrico CAD 3D.

Con base en la propuesta de diseño del aerogenerador tipo ASWT, se llevó a cabo el desarrollo del modelo geométrico tridimensional (CAD 3D) utilizando el software SolidWorks. Este modelo permitió visualizar con precisión la configuración del rotor y facilitó su posterior análisis estructural y aerodinámico.

III. Etapa correspondiente al estudio teórico/práctico.

Durante esta etapa, se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Evaluación del diseño empleando técnicas numéricas CFD y FEM.

Se evaluó el desempeño del aerogenerador propuesto mediante herramientas de simulación numérica, específicamente la Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD), utilizando como insumo las características del viento previamente obtenidas. Las simulaciones permitieron estimar el comportamiento del flujo del aire alrededor del rotor, así como predecir su rendimiento aerodinámico y su capacidad de generación de energía.

A partir de la distribución de presiones resultante del análisis CFD, se realizó un análisis estructural utilizando el Método de Elementos Finitos (FEM). Este análisis permitió evaluar la integridad mecánica del diseño frente a las cargas inducidas por el viento, identificando zonas de concentración de esfuerzos, deformaciones y posibles zonas críticas de falla estructural.

- Verificación de un caso de estudio.

Como parte del proceso de verificación del modelo numérico, se replicó un caso de estudio documentado en la literatura especializada. Esta verificación permitió corroborar la precisión y confiabilidad de los métodos empleados, así como establecer una comparación objetiva entre los resultados obtenidos del modelo propuesto y los del modelo de referencia.

IV. Evaluación de resultados y conclusiones

La etapa final de estudio se centró en la evaluación integral del desempeño del aerogenerador. Los resultados obtenidos a través de las simulaciones y pruebas experimentales permitieron validar el comportamiento del diseño bajo condiciones reales de operación. Esta evaluación condujo a conclusiones relevantes sobre la viabilidad técnica del modelo para aplicaciones de microgeneración energética en entornos urbanos, destacando su eficiencia, estabilidad estructural y capacidad de funcionamiento a bajas velocidades de viento.

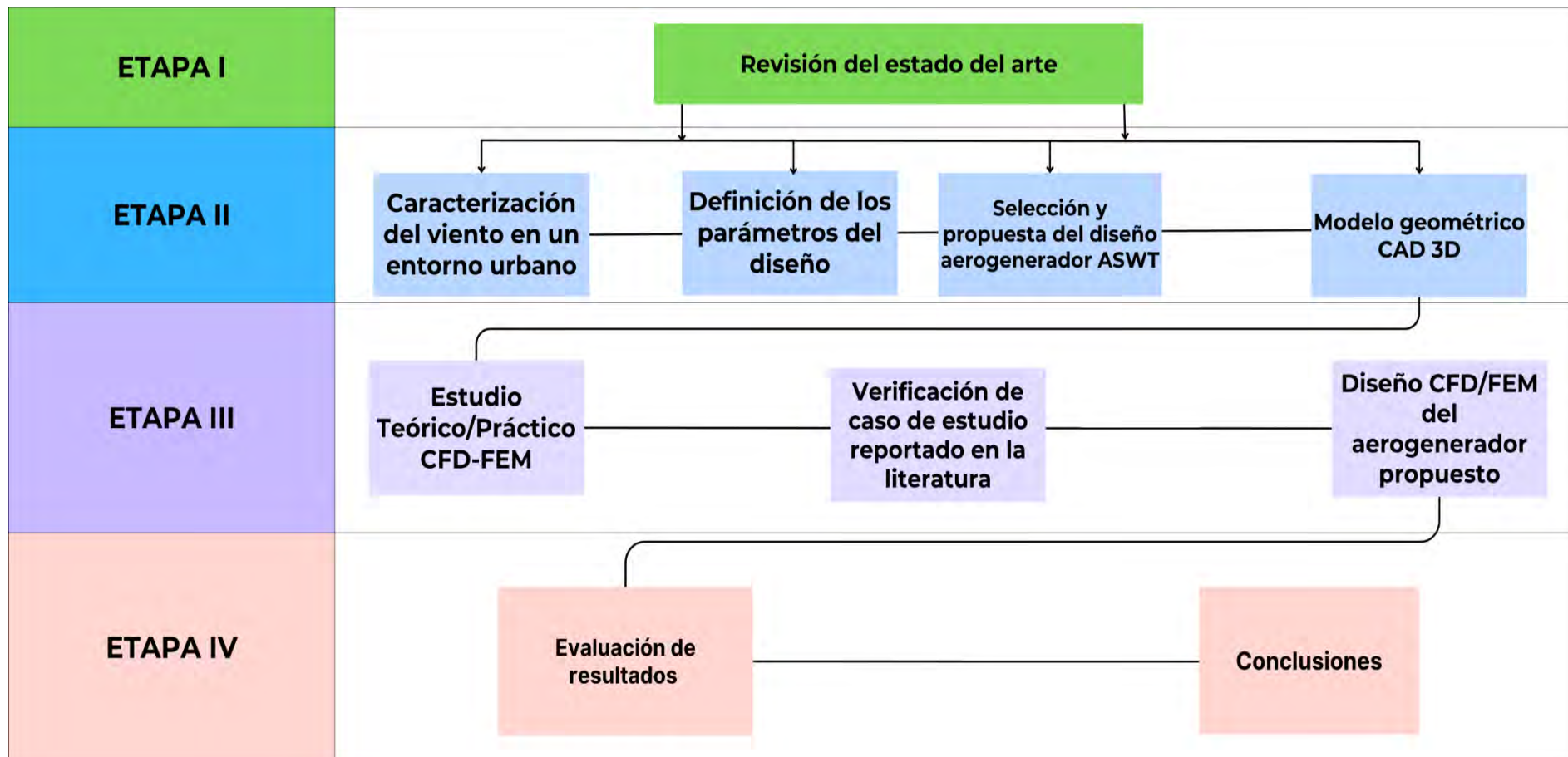


Figura 4.1 Metodología propuesta para el desarrollo del trabajo de investigación.

5 Caracterización del viento en un entorno urbano

En este estudio el elemento principal es el viento, por lo que se debe tener un enfoque adecuado de sus principales características y los factores que influyen en su comportamiento.

El viento está definido por dos parámetros esenciales, su dirección y su velocidad. A pesar de que la dirección y velocidad del viento son valores estocásticos, es decir, tienen un comportamiento no determinado, se pueden tratar mediante variables estadísticas. En este sentido, se presenta a detalle el proceso llevado a cabo para caracterizar el comportamiento estocástico del viento en el entorno urbano seleccionado, mediante técnicas estadísticas y pruebas experimentales.

5.1. Equipo de medición y características de la muestra

Durante los años 2015 y 2016, se creó una base de datos del viento a partir de mediciones experimentales de viento en el edificio de posgrado del Instituto de Energías Renovables (IER) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), ubicado en Temixco, Morelos, (Figura 5.1). Para la caracterización del viento se empleó un anemómetro ultrasónico de tres ejes de la marca Gill Instruments, cuyas medidas se pueden observar en la Figura 5.2, mientras que en la Figura 5.3, se muestra su instalación en el edificio de posgrado del IER-UNAM. Este anemómetro ultrasónico, puede monitorear velocidades del viento en un intervalo de 0 a 50 m/s, con resolución de velocidades en los tres ejes a partir de componentes X, Y y Z a una frecuencia de muestreo de 1 Hz, permitiendo tanto valores positivos como negativos de velocidades, la capacidad de lectura de la dirección del viento es de 0 a 360° y también se pueden adquirir mediciones de temperatura.



Figura 5.1 Edificio de posgrado del Instituto de Energías Renovables, UNAM.

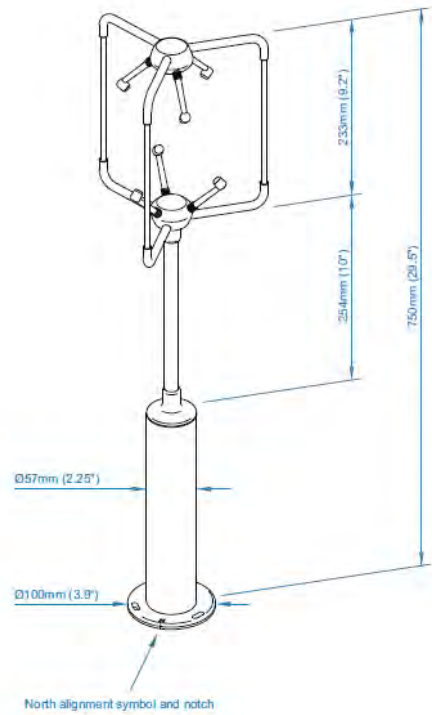


Figura 5.2 Anemómetro ultrasónico de tres ejes.



Figura 5.3 Anemómetro ultrasónico Wind Master 3D Gill Instruments en el edificio de posgrado del Instituto de Energías Renovables.

El anemómetro ultrasónico empleado está fabricado de aluminio y fibra de carbono, es ideal para el estudio de flujos turbulentos cerca de construcciones, así como en sitios para la instalación de turbinas eólicas y sitios de medición de flujo y meteorología. La base de datos generada contempla un periodo de muestreo de las 14:51 horas del 28 de abril de 2015 a las 13:14 horas del 11 de mayo de 2016. El muestreo abarca un periodo de 378.95 días, registrando datos del viento cada minuto, lo que se traduce a un total de 545,695 datos que debieron ser adquiridos y almacenados por el sistema. Sin embargo, existieron dos periodos en los cuales el anemómetro presentó fallas y no capturó datos. En la Figura 5.4, se muestra la serie temporal de velocidad del viento para el periodo de 378.95 días.

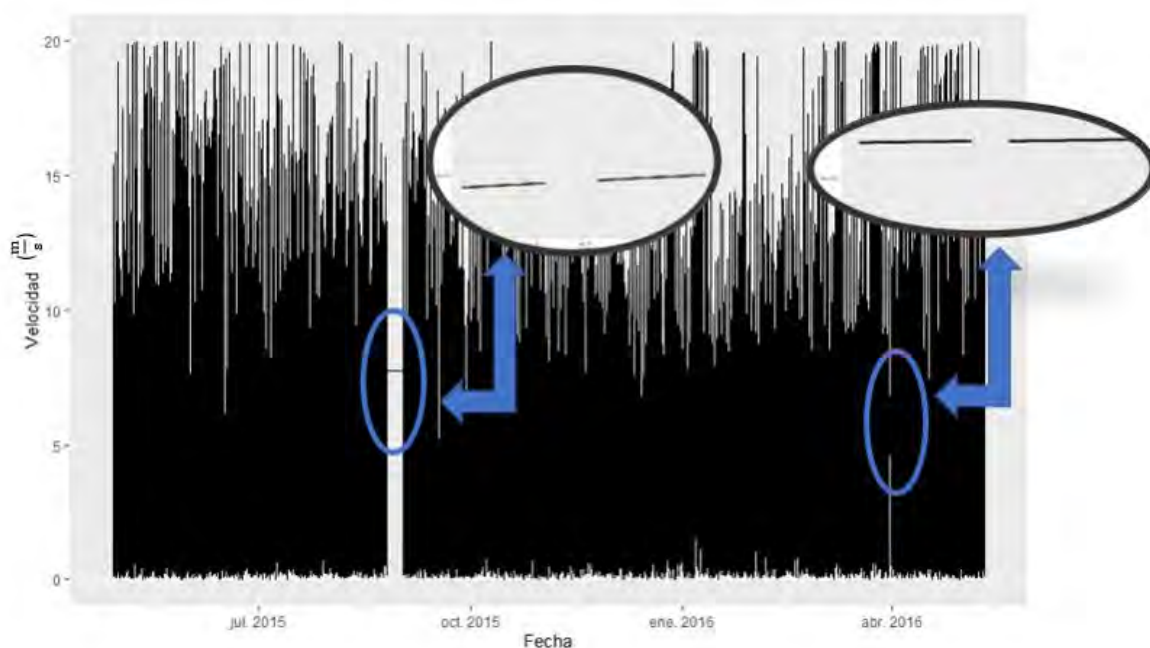


Figura 5.4 Serie temporal con muestra de datos no capturados.

A partir de un análisis de la Figura 5.4, se puede observar que desde las 16:26 horas del 25 de agosto de 2015 hasta las 14:41 horas del 01 de septiembre de 2015, el sistema no almacenó ningún dato, lo que se traduce en una pérdida de 9,975 datos. De la misma manera para el periodo comprendido entre las 15:04 horas del 30 de marzo de 2016 y las 11:35 horas del 31 de marzo de 2016, el sistema no almacenó ninguna información, perdiendo un total de 1,231 datos. La representación gráfica de estos dos periodos de pérdida de información se muestra en las Figuras 5.5 y 5.6, respectivamente.

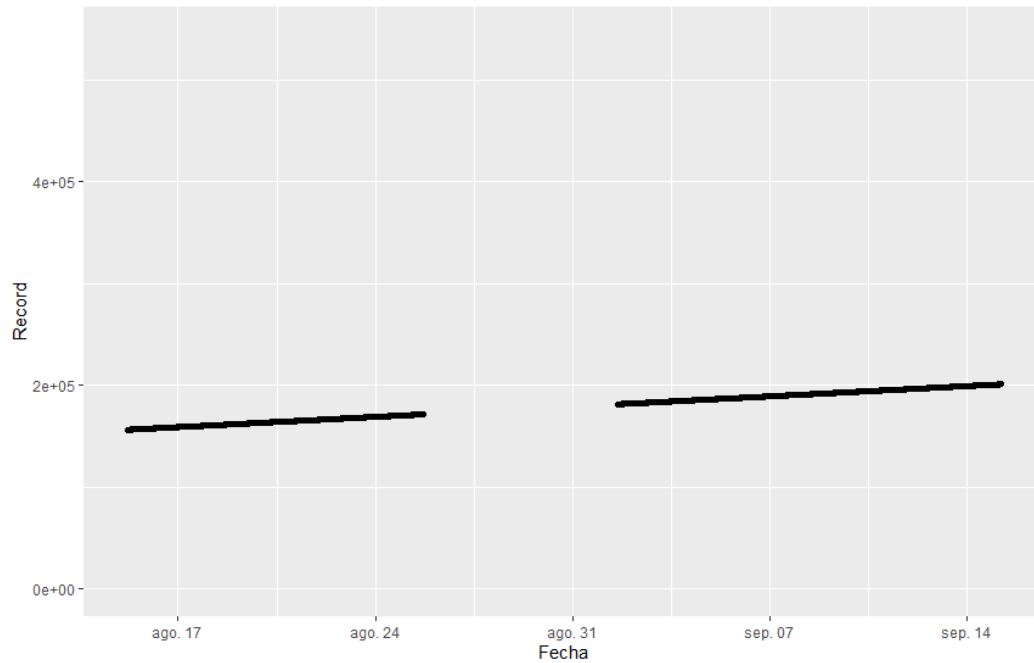


Figura 5.5 Gráfica con el intervalo de datos no capturados en el primer periodo.

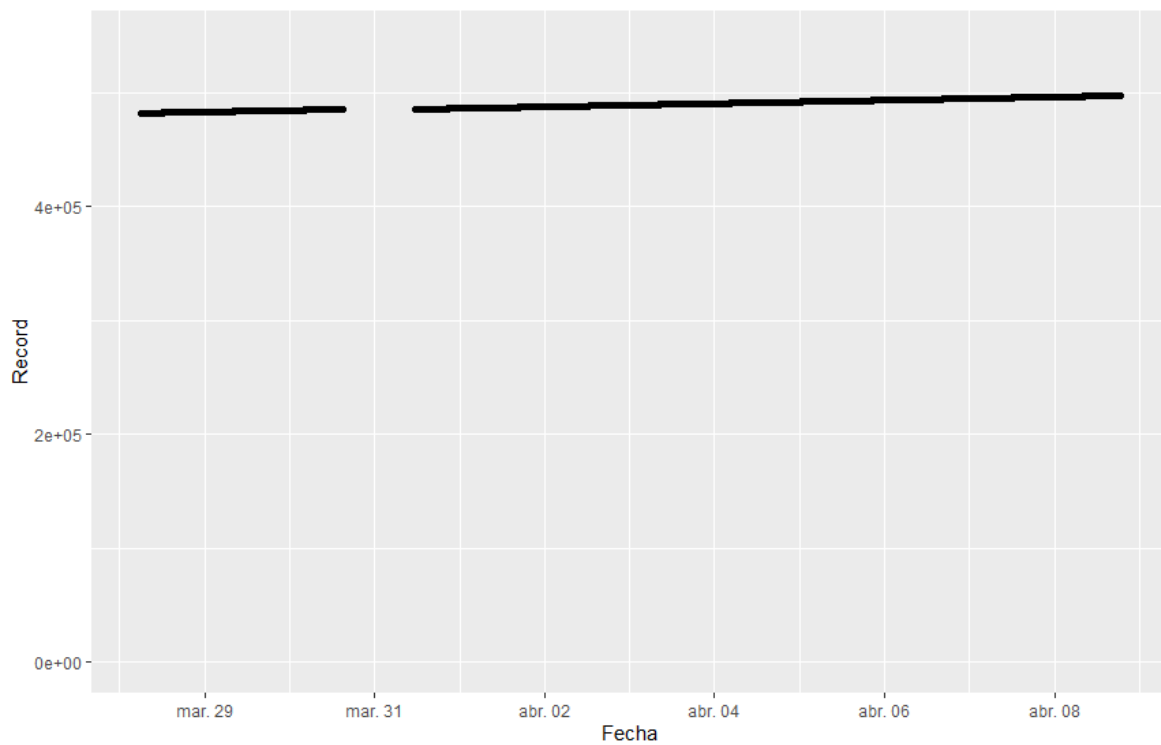


Figura 5.6 Gráfica con el intervalo de datos no capturados en el segundo periodo.

De los datos mostrados en las Figuras 5.4 a la 5.6, el sistema presentó un total de 11,206 datos que no fueron capturados adecuadamente en la base de datos, dejando la base de datos procesada con 534,489 datos.

Para realizar el análisis estadístico de la base de datos, es necesario tratar los datos con el propósito de corroborar que no se cuente con valores nulos o que muestren algún error en la medición, garantizando así una base de datos estable, consistente, confiable y precisa. En este sentido, se evaluó el comportamiento de los datos almacenados por el sistema, donde se encontraron valores desproporcionadamente altos (999.99), los cuales indican errores de medición del instrumento. De la misma manera, se realizó una limpieza y filtrado de los datos para valores que se encuentren dentro del intervalo de 0 y 20 m/s que representan las velocidades máximas y mínimas posibles del sitio de medición. Durante este proceso, se descartaron 1,946 datos, obteniéndose finalmente una base de datos de 532,543 datos.

En la Tabla 5.1, se muestra numéricamente el resumen de la base de datos original, los problemas de almacenamiento de datos del sistema, los errores de medición del instrumento, el filtrado de datos en el intervalo de velocidades posibles para el sitio de medición, y finalmente, la cantidad de datos de la base de datos final.

Tabla 5.1 Resumen del proceso de filtración de datos la base de datos generada experimentalmente.

Tipo de datos	Cantidad	Porcentaje (%)
Datos totales procesados en el periodo de operación.	545,695	100
No capturados.	-11,206	-2.05
Fuera del intervalo. [0,20]	-1,943	-0.17
Nulos.	-3	-0.0005
Datos finales.	532,543	97.58

5.2. Análisis estadístico de los datos

La caracterización del comportamiento del viento en el sitio analizado se realizó a través de un análisis estadístico de la base de datos final (532,543 datos) empleando el software R Studio.

Dado que la base de datos contiene velocidades del viento para sus tres componentes (X, Y y Z), así como valores positivos y negativos del viento, se obtuvo la magnitud resultante de

la velocidad y dirección del viento en el plano horizontal XY, como se muestra en la Figura 5.7.

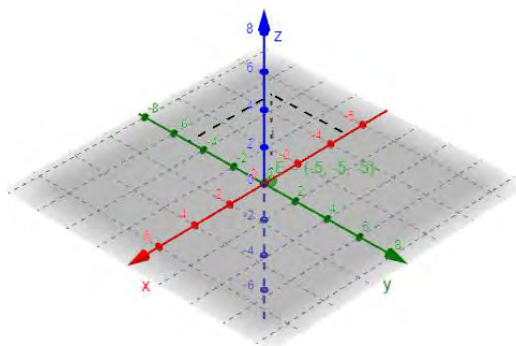


Figura 5.7 Representación del plano horizontal dado por los ejes X y Y.

Para el estudio del viento, es importante tener en cuenta ciertas consideraciones sobre el periodo de recolección de datos del viento. Estas consideraciones parten del espectro de Van Der Hoven mostrado en la Figura 5.8, el cual representa las variaciones de la velocidad del viento horizontalmente (energía cinética del viento) en función de las frecuencias, divididas en dos rangos: macro meteorológico y micro meteorológico. Este espectro presenta tres picos distintivos. El primer pico está asociado con fenómenos atmosféricos de gran escala, como lo son las fluctuaciones causadas por cambios en la velocidad y dirección del viento debido a la rotación de la tierra, así como la interacción de diferentes masas de aire con distintas temperaturas y presiones. El segundo pico corresponde a las fluctuaciones diarias del viento debido a los ciclos térmicos entre el día y la noche. El tercer pico corresponde al rango micro meteorológico, el cual está asociado con las ráfagas o turbulencia. Esto resalta la existencia de fluctuaciones de tipo estacionales y otras horarias. Existiendo una separación espectral entre picos, que cubre aproximadamente desde los diez minutos hasta las dos horas, donde no se concentran grandes picos de energía y permite obtener mediciones más estables sin sobreestimar o subestimar los valores de medición del viento [59]. Asimismo, para tener análisis más certeros sobre las características de las bases de datos del viento, como lo es la intensidad de turbulencia, es recomendable utilizar periodos de toma de datos no mayores a una hora, por convención en la ingeniería de energía eólica usualmente se utilizan periodos de diez minutos, una práctica respaldada por la norma IEC 61400-2 para aerogeneradores de baja potencia [13][55].

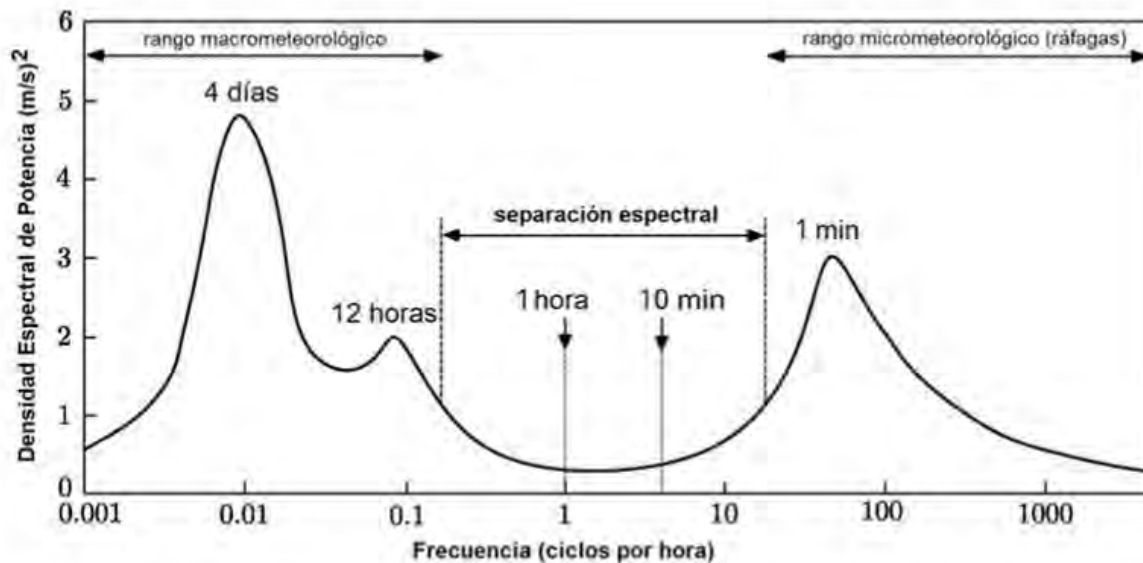
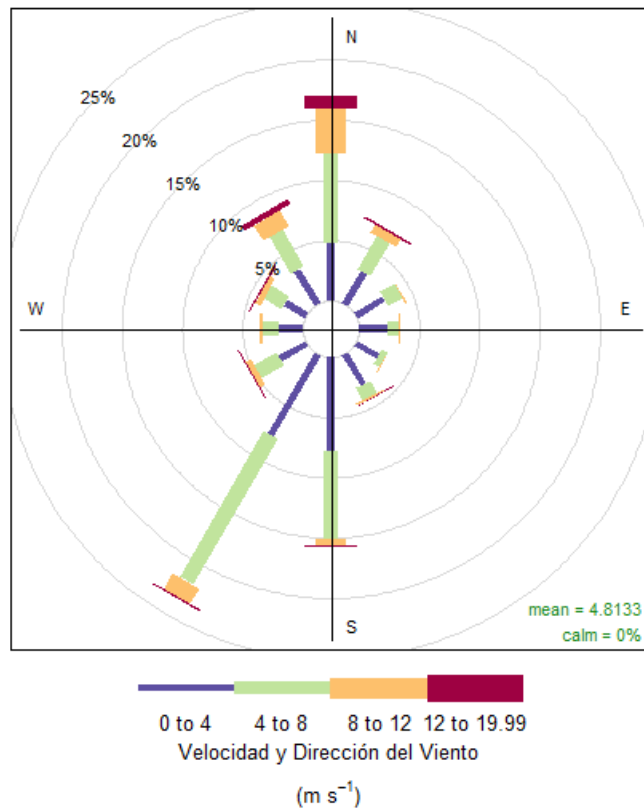


Figura 5.8 Espectro horizontal de velocidad del viento por Van der Hoven [59].

En este sentido, se trató la base de datos y se agruparon los datos en periodos de diez minutos, donde se determinaron la velocidad promedio, temperatura, dirección, velocidades máximas y mínimas, desviación estándar e intensidad de turbulencia.

Comenzando con el análisis de las direcciones en el plano horizontal, esto ofrece la oportunidad de visualizar y caracterizar la dirección del viento en los 360°, a través de una representación gráfica conocida como la rosa de los vientos (Figura 5.9). Esta rosa de los vientos muestra las magnitudes y direcciones predominantes que se registraron del viento. La dirección predominante está ubicada en el suroeste, con velocidades mayormente comprendidas entre 4 y 8 m/s, seguidas por velocidades entre 0 y 4 m/s. En segundo lugar, las direcciones predominantes incluyen el norte y el sur: en el norte, las velocidades más frecuentes oscilan entre 4 y 8 m/s, seguidas por velocidades de 0 a 4 m/s, notando la presencia de velocidades entre 8 y 12 m/s, aunque en menor medida. En cuanto al sur, las velocidades predominantes son de 0 a 4 m/s y de 4 a 8 m/s. Esta información nos brinda una guía sobre la posición recomendada para ubicar el aerogenerador propuesto, con el propósito de aprovechar de manera eficiente la energía cinética disponible en el viento.



Frequency of counts by wind direction (%)

Figura 5.9 Rosa de los vientos de elaboración propia.

Por otra parte, cabe mencionar que el instrumento utilizado para la medición experimental tiene la capacidad de registrar y almacenar datos de la temperatura del sitio de medición a la misma resolución y capacidad de almacenamiento que la velocidad del viento, permitiendo así, la obtención de una temperatura promedio, la cual se utiliza para determinar la viscosidad dinámica y cinemática del viento a esa temperatura. Estas viscosidades se determinan utilizando la tabla de propiedades termodinámicas del aire a presión atmosférica de la Tabla 5.2. La Figura 5.10 muestra la serie temporal de la base de datos en términos de la temperatura del sitio de medición para intervalos de 10 minutos, donde se obtiene una temperatura promedio de 26.14118 °C. Esta temperatura promedio corresponde a una viscosidad dinámica de $1.8542 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$, así como una viscosidad cinemática de: $1.5725 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, de acuerdo con la tabla de las propiedades termodinámicas del aire a presión atmosférica.

Tabla 5.2 Tabla de las propiedades del aire a 1 atm de presión [60].

Propiedades del aire a 1 atm de presión

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Densidad $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico C_p $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Nota: Para gases ideales, c , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P distinta a 1 atm se determinan cuando se multiplican los valores de ρ a la temperatura dada por P (en atm) y cuando se dividen ν y α entre P (en atm).

Fuente: Datos generados a partir del Software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198; and Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, y P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

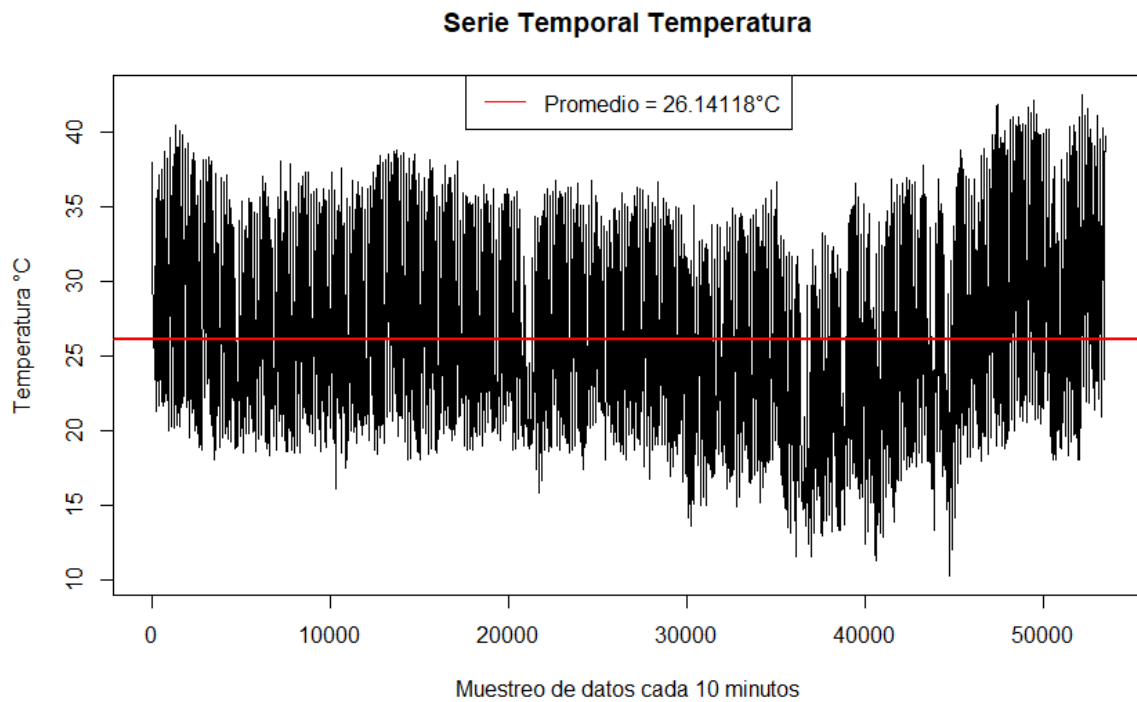


Figura 5.10 Serie temporal temperatura de elaboración propia.

Para observar el comportamiento del viento durante la prueba experimental, se generó una serie temporal de la velocidad del viento para periodos de muestreo de 10 minutos, como se ilustra en la Figura 5.11.

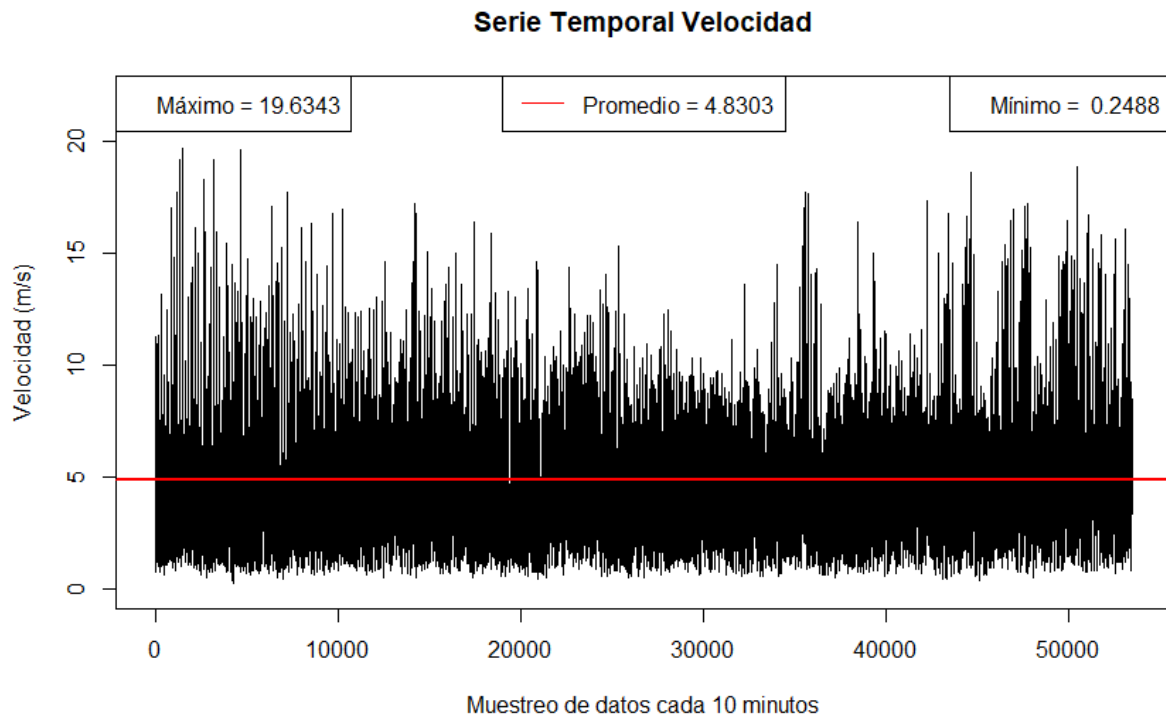


Figura 5.11 Serie temporal viento de elaboración propia.

A partir del procesamiento y análisis de la serie temporal de la velocidad del viento, se determinó una velocidad promedio del viento de 4.8303 m/s, así como velocidades máximas y mínimas de 19.6343 m/s y 0.2488 m/s, respectivamente.

Además, se realizó un histograma de las velocidades del viento que permite ver la cantidad de ocurrencias de diferentes velocidades. Este histograma tiene un ancho de los intervalos (bin) de 1 m/s. Las distribuciones de ocurrencia de velocidades para los intervalos establecidos se muestran en la Figura 5.12. Lo que nos permite identificar el intervalo de viento predominante, que se encuentra entre 1 a 9 m/s.

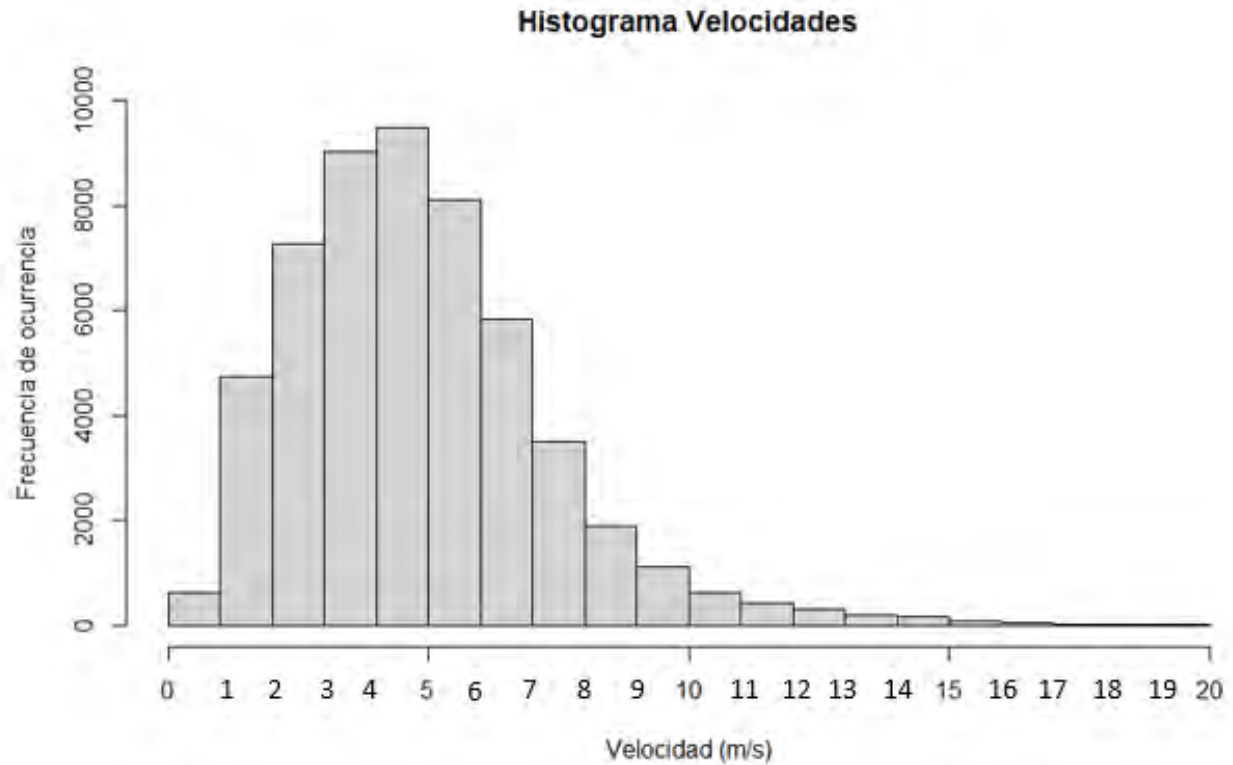


Figura 5.12 Histograma velocidades de viento de elaboración propia.

Otro parámetro importante para caracterizar el comportamiento de viento es la Intensidad de Turbulencia. La turbulencia se puede considerar como fluctuaciones en el flujo del aire. La intensidad de turbulencia es una escala que caracteriza la turbulencia expresada como un porcentaje, la cual se define como la relación entre la desviación estándar de la velocidad del viento y la velocidad promedio del viento.

$$\text{Intensidad de turbulencia} = \frac{\sigma_u}{U} \quad (5.1)$$

La intensidad de turbulencia está frecuentemente en el rango de 0.1 a 0.4. Las intensidades de turbulencia altas ocurren a bajas velocidades de viento. Un flujo de aire idealizado sin fluctuaciones en la velocidad o dirección del viento tendría un valor de intensidad de turbulencia del 0%. Este caso idealizado nunca ocurre en la tierra. Sin embargo, por la manera en la que se calcula la intensidad de turbulencia de una forma estadística, son posibles los valores superiores al 100%. Esto puede suceder cuando la velocidad promedio del viento es pequeña y hay grandes fluctuaciones presentes [61][62].

A partir de la serie temporal mostrada en la Figura 5.13, se determinó una intensidad de turbulencia promedio de 0.3082. Asimismo, al evaluar el comportamiento del histograma mostrado en la Figura 5.14, se observa que la frecuencia de ocurrencia mayoritaria se

encuentra en el intervalo de intensidades de turbulencia de 0.1 a 0.4, disminuyendo a partir del valor de 0.5.

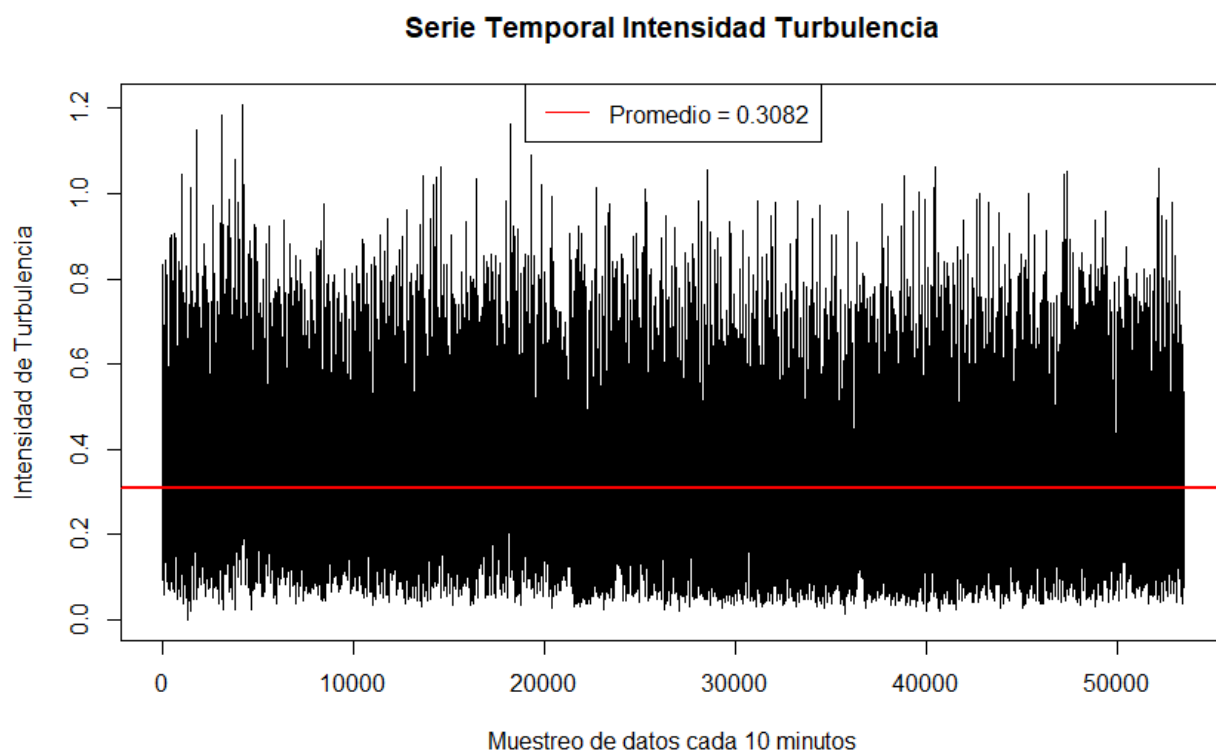


Figura 5.13 Serie Temporal Intensidad Turbulencia de elaboración propia.

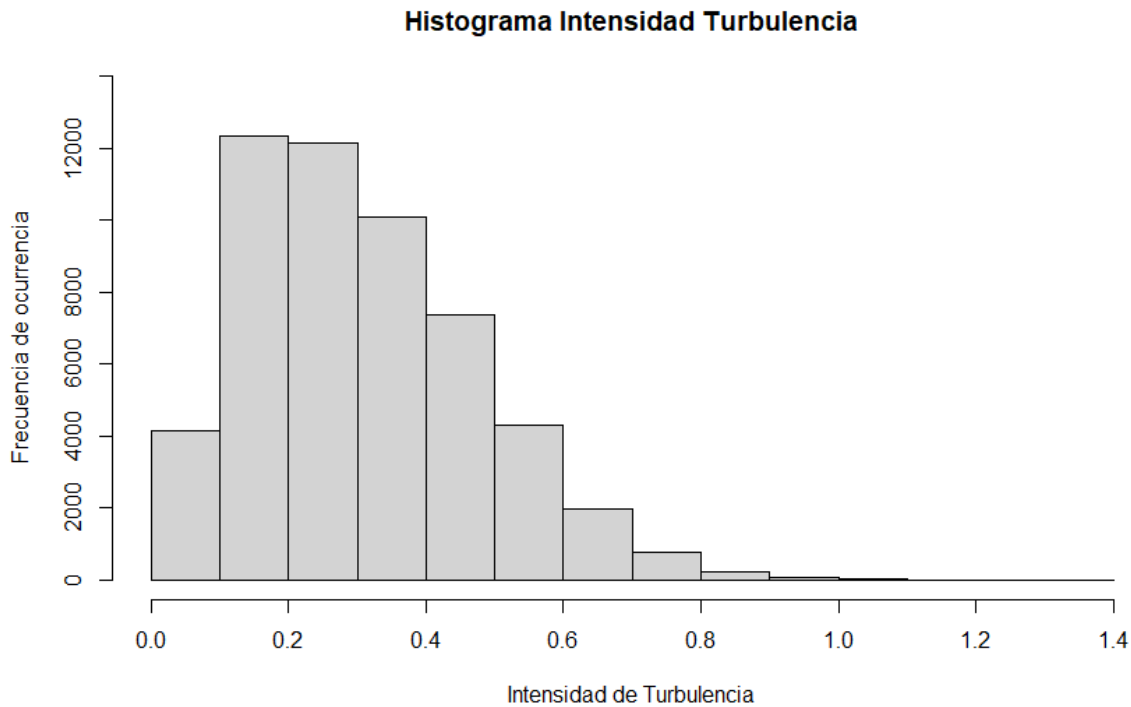


Figura 5.14 Histograma Intensidad Turbulencia de elaboración propia.

De similar manera al procedimiento realizado tanto para la velocidad del viento e intensidad de turbulencia, se obtuvieron las velocidades máximas y mínimas del viento en cada bloque de 10 minutos, como se muestra en la serie temporal de la Figura 5.15. Se determinó una velocidad máxima de 19.98996 m/s. Por otro lado, en la Figura 5.16 se presenta la serie temporal de las velocidades mínimas, con un valor mínimo de 0.00352278 m/s. Estos datos proporcionan información crucial sobre las velocidades extremas del viento a las que podría estar sometido el aerogenerador propuesto. A partir de esta información, se pueden determinar los posibles esfuerzos tanto para el aerogenerador como para su base de soporte, considerando las velocidades máximas registradas como cargas estáticas críticas. Además, se utilizarán las cargas dinámicas, derivadas de la variación temporal de las distintas velocidades de viento en términos de diferenciales de presión, para evaluar el comportamiento del aerogenerador bajo cargas de fatiga.

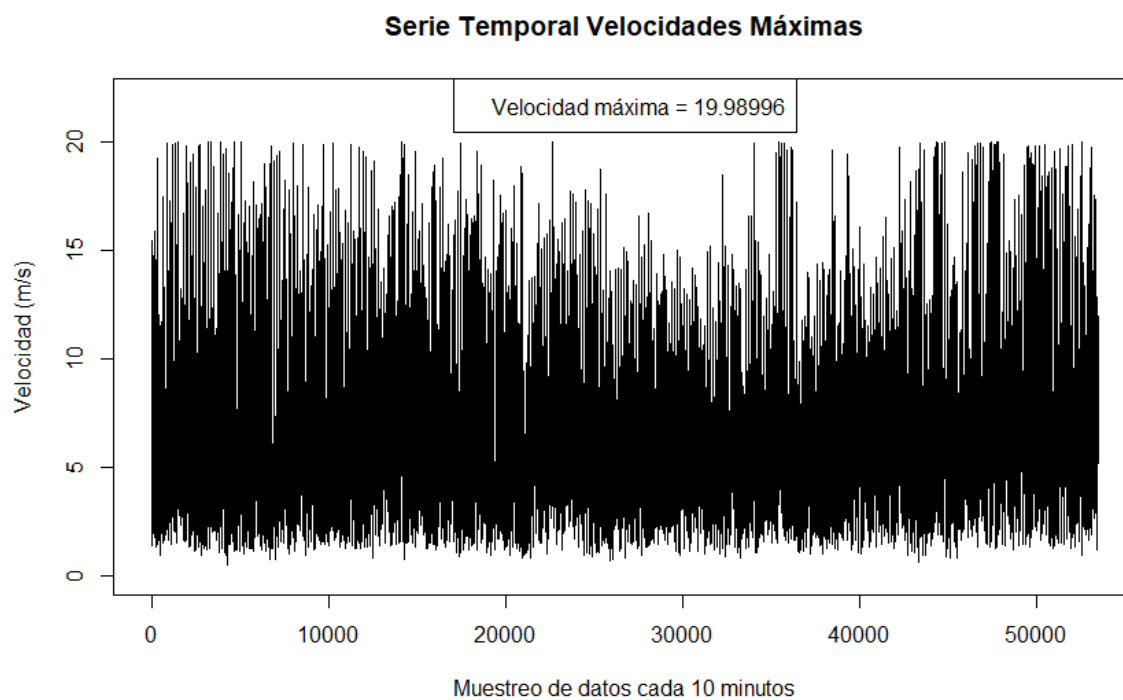


Figura 5.15 Serie Temporal Velocidades Máximas de elaboración propia.

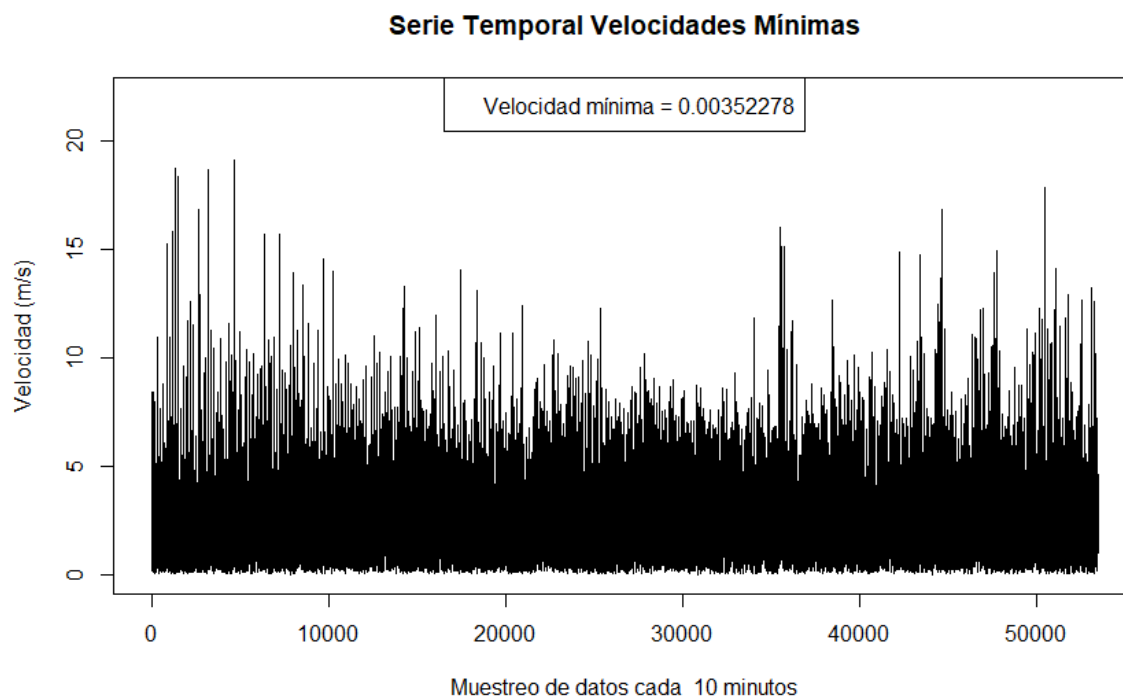


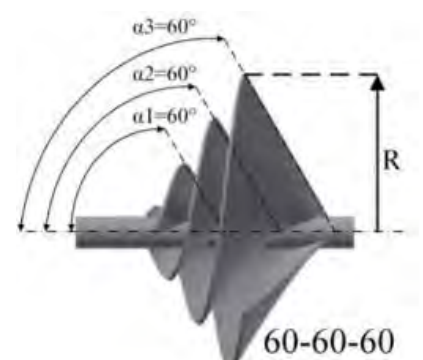
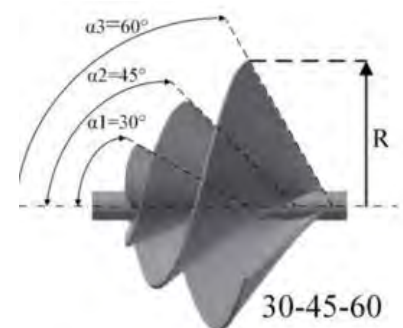
Figura 5.16 Serie Temporal Velocidades Mínimas de elaboración propia.

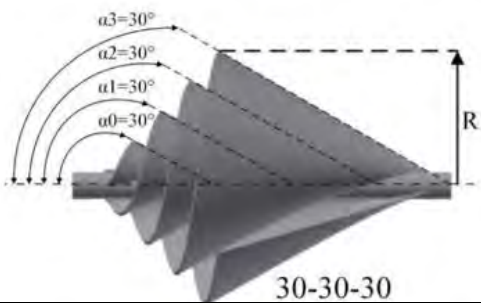
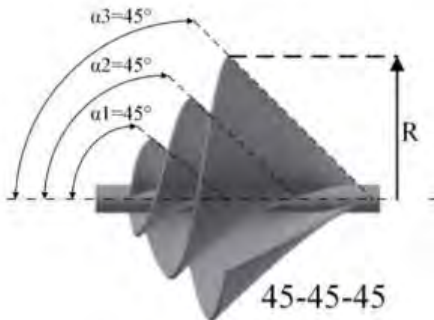
La caracterización de la base de datos realizada en este apartado es crucial, ya que proporciona información sobre los intervalos de velocidad del viento predominantes en la zona donde se realizaron las mediciones. Además, ofrece datos sobre las velocidades mínimas, máximas, dirección e intensidades de turbulencia. Estos datos son fundamentales para el diseño de un aerogenerador eficiente que pueda aprovechar de manera adecuada el recurso eólico disponible en la zona. La comprensión precisa de las condiciones del viento facilita el desarrollo de un aerogenerador adaptado a las características específicas del entorno, permitiendo maximizar su rendimiento y contribuyendo al objetivo de generar energía verde distribuida de una forma más efectiva.

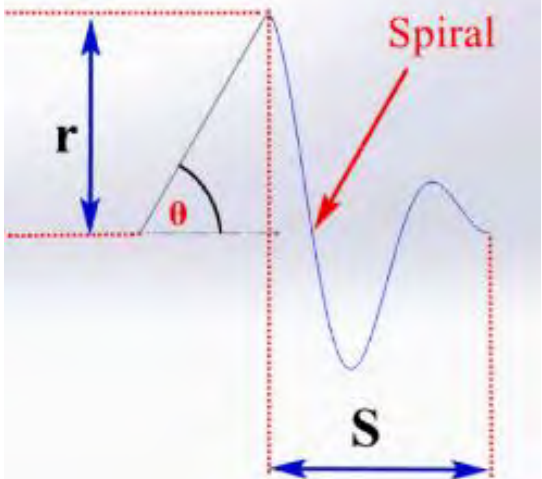
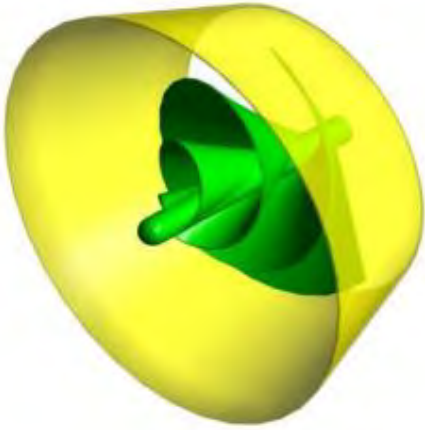
6 Definición de los parámetros de diseño

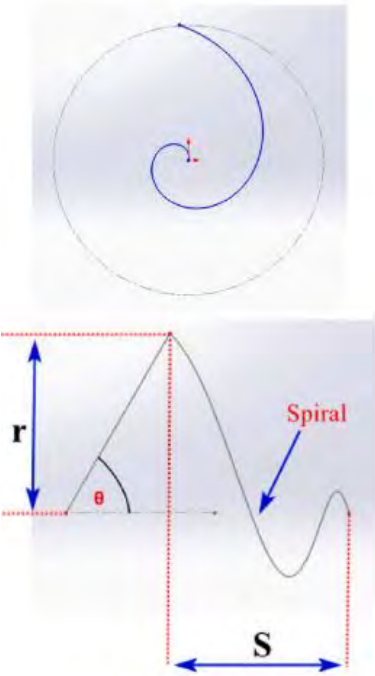
Los aerogeneradores tipo ASWT tienen el espiral como su característica de diseño principal. Sin embargo, existen distintos parámetros de diseño que permiten modificarlos de acuerdo con las características u objetivos deseados. En la Tabla 6.1, se muestra un comparativo de los principales parámetros de diseño empleados en los aerogeneradores tipo ASWT, su definición, aporte y representación gráfica.

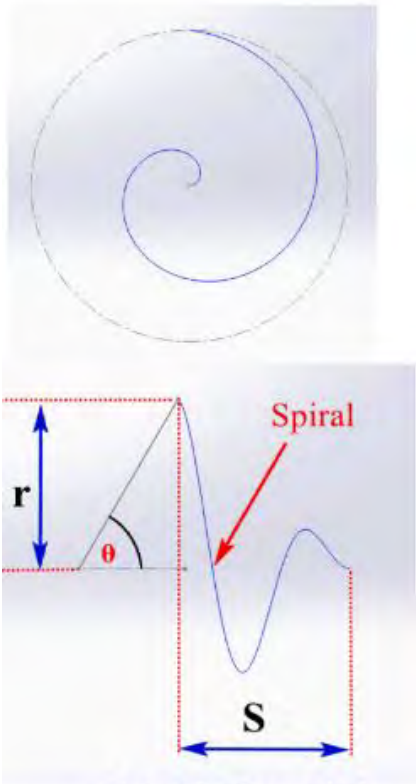
Tabla 6.1 Definición de parámetros de diseño en aerogeneradores tipo ASWT.

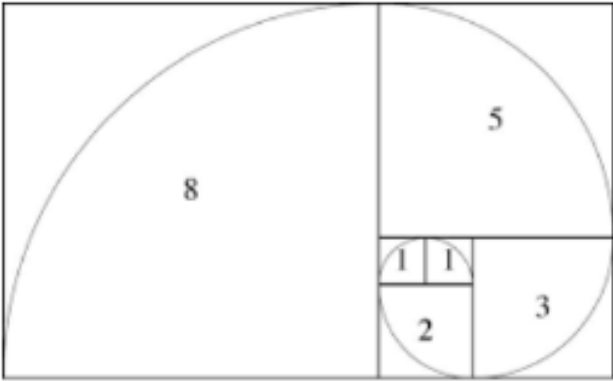
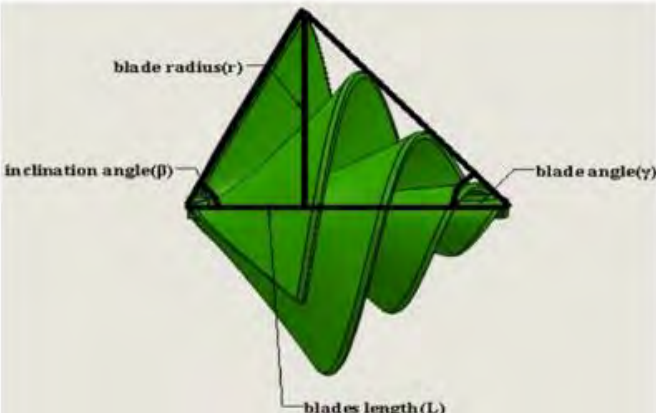
Parámetro de diseño	Definición	Aporte	Representación
Ángulos fijos de aspa [1].	Tres aspas del aerogenerador con el mismo ángulo de inclinación respecto al eje.	Estabilidad en la generación de vórtices de punta de aspa, estabilidad ante turbulencias. Mejor configuración 60°-60°-60°	 60-60-60
Ángulos variables de aspa [1].	Tres aspas del aerogenerador con el diferente ángulo de inclinación respecto al eje.	Una configuración de ángulos variables permite el mejor paso del flujo, otorgando un mayor rango de operación.	 30-45-60

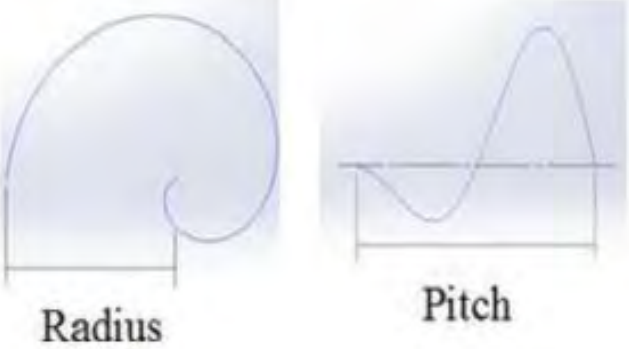
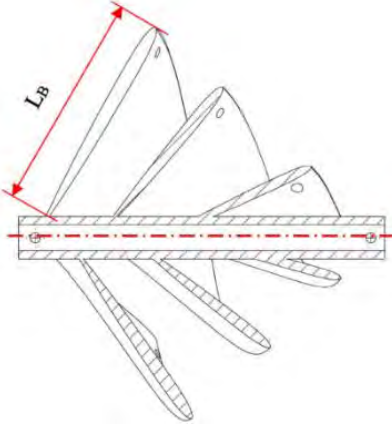
Ángulos de aspa pequeños [1].	Tres aspas del aerogenerador con ángulos entre 15 y 45°.	Permite que la corriente de viento sin perturbaciones pase más fácilmente.	 30-30-30
Ángulos de aspa grandes [1].	Tres aspas del aerogenerador con ángulos entre 45 y 90°.	Rango amplio de operación TSR y mayor coeficiente de empuje.	 45-45-45

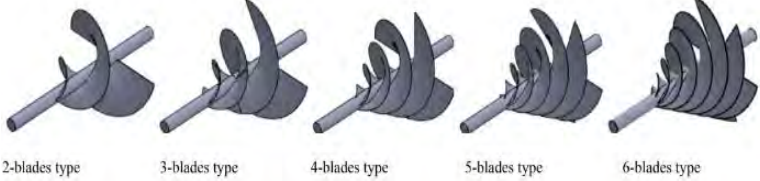
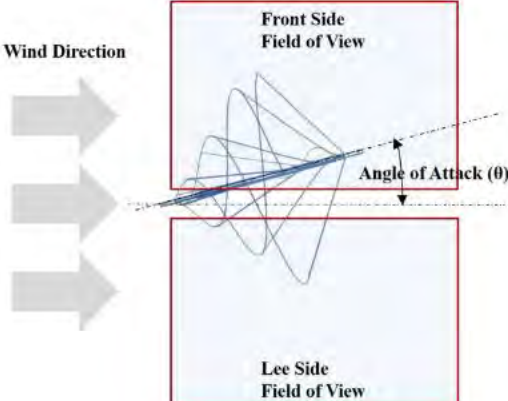
Ángulo de apertura [37] [43].	Ángulo de apertura de la espiral para darle la forma al aspa trasera. Determina el ángulo con el que el aire sale del aerogenerador con respecto al aire entrante.	Ángulos mayores a 70° crean una zona de baja velocidad en las aspas delanteras, región que se considera la principal razón de la disminución del C_p. Mientras que, ángulos menores a 60° muestran un mayor C_p pero su rango de operación es menor, el cual decae a partir de $\lambda > 2$	
Adición de un concentrador [44].	Introducción del aerogenerador en un concentrador, el cual aumenta el rendimiento del sistema.	La potencia del aerogenerador es proporcional a la velocidad de la corriente de viento. El concentrador ayuda a capturar el aire de un área grande a una más pequeña, aumentando la velocidad de las líneas de corriente. Por lo tanto, aumenta la potencia generada.	

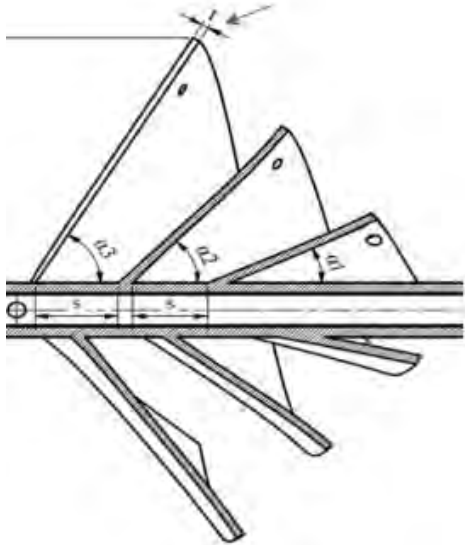
Espiral logarítmica [43].	Uso de un espiral logarítmica como base para el diseño de las aspas del rotor.	El perfil logarítmico tiene un buen desempeño, sin embargo, ese desempeño lo consigue únicamente en rangos de operación bajos y con configuraciones de grandes ángulos de apertura.	 The diagram consists of two parts. The top part shows a blue logarithmic spiral on a light blue background, with a red dot at its center and a red arrow indicating the direction of growth. The bottom part shows a geometric construction of a logarithmic spiral. It features a right-angled triangle with a horizontal base and a vertical height. The height is labeled with a blue double-headed arrow and the letter r. The angle between the base and the hypotenuse is labeled with a red arc and the Greek letter θ. A red dashed line extends from the top vertex of the triangle, and a blue arrow labeled Spiral points to a blue curve that starts at the top vertex and follows the path of the red dashed line. The horizontal distance from the base of the triangle to the end of the spiral is labeled with a blue double-headed arrow and the letter S. (a) Logarithmic spiral
----------------------------------	---	--	---

Espiral de Arquímedes [43].	Uso de un espiral de Arquímedes como base para el diseño de las aspas del rotor.	El espiral de Arquímedes, tiene un mejor desempeño que el espiral logarítmico, ya que presenta un rango de operación más amplio para diseños con ángulos de apertura $< 70^\circ$.	 The diagram illustrates the Archimedean spiral. The top part shows a full spiral curve. The bottom part is a detailed geometric construction of a single cycle of the spiral. It shows a triangle with a base angle θ and a vertical height r. The spiral curve is shown oscillating between two horizontal dashed lines, with the total horizontal distance of one cycle labeled S. A red arrow points to the curve with the label "Spiral". (b) Archimedean spiral
------------------------------------	---	---	---

Espiral de Fibonacci [63].	Uso de un espiral de Fibonacci como base para el diseño de las aspas del rotor.	El uso de la espiral de Fibonacci mostró ser adecuado para resistir turbulencias de viento. Sin embargo, necesita por lo menos una velocidad del viento de 5 m/s para comenzar a funcionar.	
Relación de aspecto (D/L) [36].	Relaciona la diferencia que existe entre las magnitudes del diámetro y la longitud del rotor.	Una relación de aspecto < 1 presenta un mayor coeficiente de potencia debido a que provee la mayor área de contacto entre aspas y fluido, pero genera mayor cantidad de fluctuaciones, lo que conlleva a problemas de fatiga mecánica.	

Relación Pitch con radio [37].	El pitch se considera como la distancia axial medida cuando el espiral realiza una rotación completa. La relación se establece en términos de cuantas veces el radio será igual a la dimensión del <i>pitch</i>.	Conforme se incrementa el <i>pitch</i> el C_p aumenta, siendo el límite sugerido de 1.5 debido a que más allá de ese valor, el C_p empieza a disminuir.	 The diagram consists of two parts. The left part shows a spiral shape with a horizontal line below it labeled 'Radius'. The right part shows a sine wave with a horizontal line below it labeled 'Pitch'.
Perfil aerodinámico [31].	Uso de perfiles aerodinámicos en las aspas del aerogenerador.	El uso de un perfil aerodinámico permite incrementar el caudal de trabajo, disminuyendo la fricción entre el rotor y el flujo. Además, genera diferencias de presiones que incrementan la captación de energía.	 The diagram shows a cross-section of a blade with a red arrow labeled L_B indicating the length of the blade. The blade is shown in a curved position, and the diagram illustrates the aerodynamic profile and the flow of air around it.

Número de aspas [28].	Evaluación del comportamiento aerodinámico del rotor en función del número de aspas.	El mejor desempeño del rotor se presenta para un diseño de tres aspas, teniendo la mejor relación de contacto y paso del fluido, así como la mayor generación de torque.	
Ángulo de ataque del rotor con respecto a la dirección del flujo de viento [29].	Variación de la inclinación del aerogenerador, con el propósito de modificar el ángulo de entrada del flujo de viento.	Se recomiendan ángulos de ataque pequeños, menores 10°, ya que al incrementarlo se aumentó la creación de vórtices irregulares de punta de aspa.	

Espesor de aspa [41].	Espesor de las aspas a lo largo de todo su recorrido	La disminución del espesor en las aspas del rotor mejora los valores de rendimiento y coeficiente de potencia debido al aumento del caudal volumétrico de entrada, pero complica la manufactura de las aspas del rotor.	
------------------------------	---	--	---

7 Selección del tipo de aerogenerador ASWT

Definidos los parámetros de diseño existentes para los aerogeneradores tipo ASWT y tomando en cuenta la base de datos del viento generada, se está en posibilidades de seleccionar los parámetros que el diseño propuesto va a incluir. Considerando que el objetivo del aerogenerador ASWT a diseñar en el presente trabajo de investigación, es que debe ser capaz de operar en un intervalo de velocidades más amplio, el cual incluya bajas velocidades del viento y tenga una recuperación adecuada ante los flujos turbulentos, se decidió utilizar los siguientes parámetros de diseño:

- **Número de aspas.**

Se optó por el diseño de tres aspas para el aerogenerador ASWT, ya que en la literatura se encuentra reportado y demostrado que tres es el número de aspas que mejor desempeño presenta en términos del torque y potencia comparado con las configuraciones de dos, cuatro, cinco y seis aspas, como se muestra en la Tabla 7.1. Adicionalmente, en la Figura 7.1, se muestra un comparativo en términos de eficiencia entre una turbina tipo ASWT de tres aspas y una turbina tipo propela, donde la turbina tipo ASWT presenta un mejor desempeño, principalmente a bajas velocidades [28].

Tabla 7.1 Comparación de torque obtenido para distintas configuraciones respecto al número de aspas basada en la referencia [28].

Velocidad fluido (m/s)	Torque ($N \cdot m \times 100$)									
	2-aspas		3-aspas		4-aspas		5-aspas		6-aspas	
	D/L 2/3	D/L 1/2	D/L 2/3	D/L 1/2	D/L 2/3	D/L 1/2	D/L 2/3	D/L 1/2	D/L 2/3	D/L 1/2
0.5	41.87	38.73	44.87	39.77	33.49	30.88	31.40	27.24	25.12	19.36
1	53.38	50.76	56.33	49.72	43.96	42.39	37.68	34.54	31.40	28.26
2	79.55	77.45	81.64	79.02	71.17	68.03	59.66	57.57	52.33	47.62

Donde “ D ” denota el diametro del rotor de la turbina y “ L ” representa la longitud del mismo rotor, lo que nos proporciona información sobre su relación de aspecto.

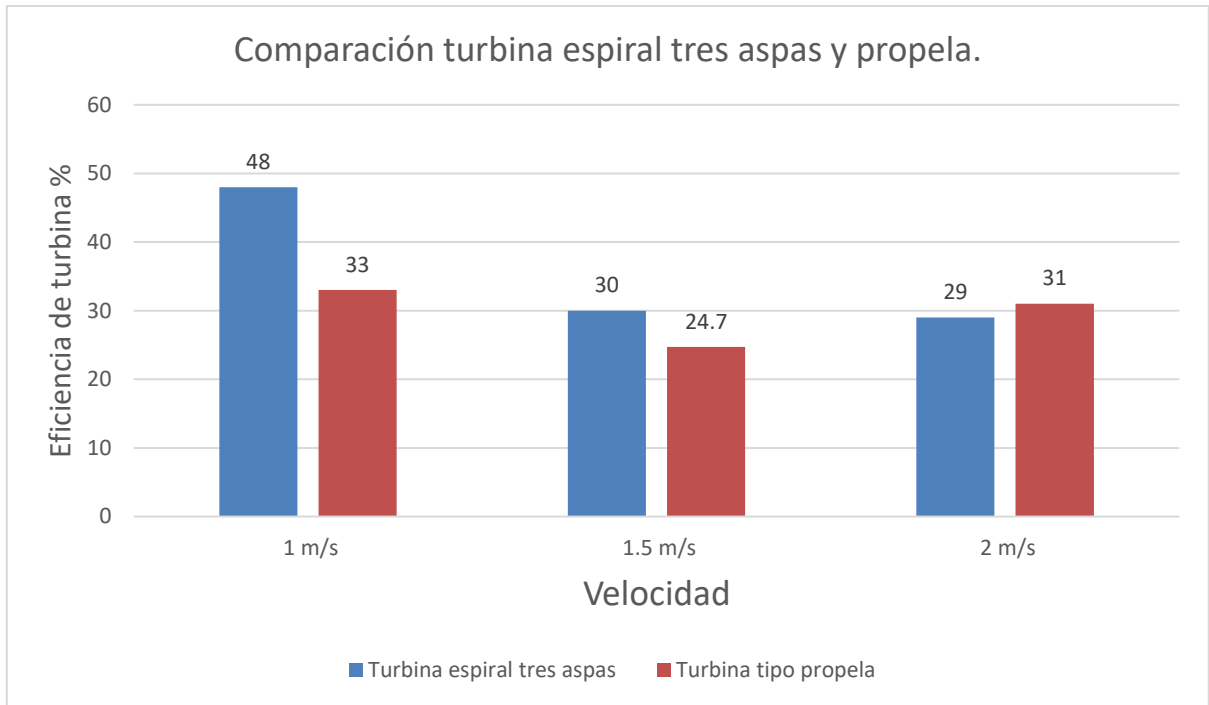


Figura 7.1 Comparación de porcentaje de eficiencia entre la turbina en espiral con tres aspas y una turbina tipo propela basada en la referencia [28].

- **Tipo de espiral.**

Se decidió utilizar un espiral tipo Arquímedes, debido a que demostró tener un mejor desempeño en cuanto al Coeficiente de Potencia Máximo (C_p max) y un mayor intervalo de operación TSR en las que puede trabajar, frente al espiral logarítmico, como se observa en la Figura 7.2 b).

El TSR se define como la relación de velocidad punta (*Tip-Speed-Ratio*), el cual sirve para comparar el funcionamiento de distintas configuraciones de aerogeneradores. Indicando que la periferia de el aspa circula a una velocidad TSR veces mayor que la velocidad del viento.

A partir del comportamiento mostrado en la Figura 7.2 a), se puede determinar un menor C_p máximo y el decaimiento temprano del mismo para el espiral logarítmico, otorgando un rango de operación menor.

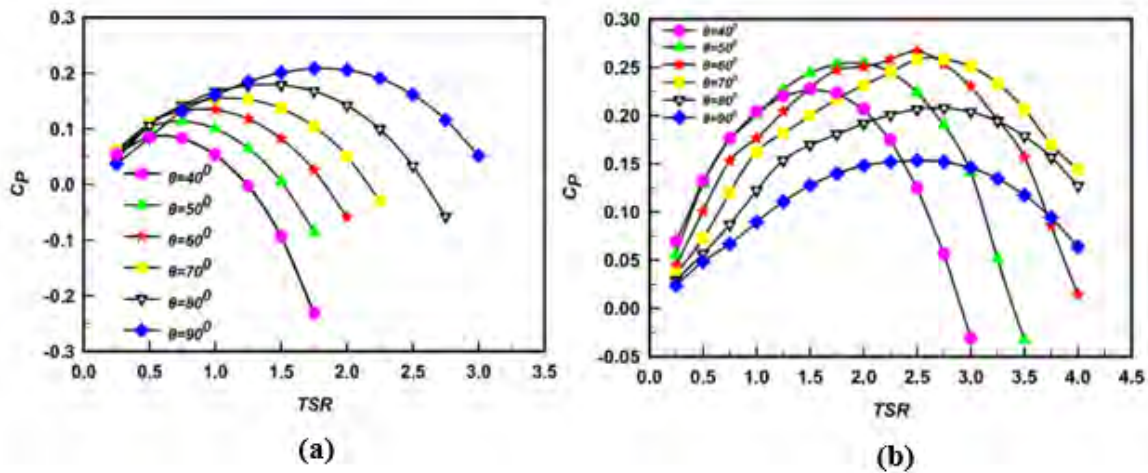


Figura 7.2 Comparación de C_p de a) Espiral logarítmico y b) Espiral de Arquímedes con distintos ángulos de apertura. [43]

Además, comparando el aerogenerador con un espiral de arquímedes contra un espiral de Fibonacci reportado por Patil [33], se encontró en la literatura que este último requirió una velocidad del viento mínima de 5 m/s para comenzar a funcionar, mientras que el aerogenerador en espiral de Arquímedes reportado por Hamid *et al.* [43], requirió una velocidad mínima de 2.5 m/s.

- **Relación de aspecto.**

Se decidió utilizar una relación de aspecto (D/L) igual a uno, con elongación delantera. Esta elección se basó en el hecho de que tiene el mayor rango de operación de TSR y presenta el C_p más alto en rango de operación bajo, lo cual la hace ideal para las bajas velocidades de viento que se encontraron previamente en la caracterización del viento, como se puede observar en la Figura 7.3. donde se compara junto a otras configuraciones de relación de aspecto. Además, una relación de aspecto menor podría ocasionar fluctuaciones y vibraciones excesivas debido a la elongación, lo que reduciría tanto la eficiencia como la vida útil del aerogenerador [36].

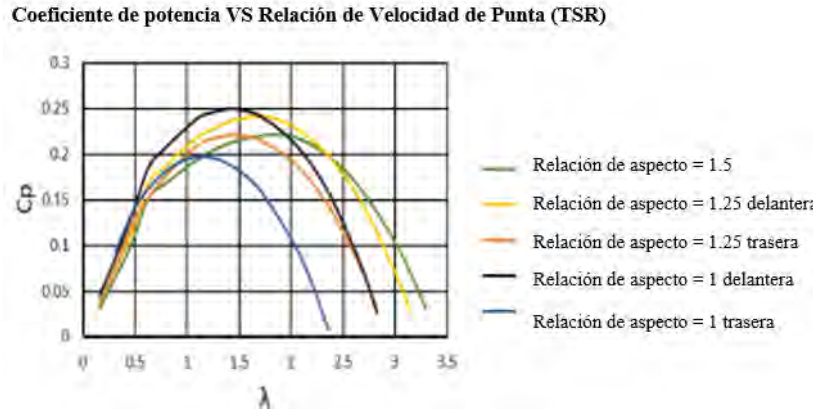


Figura 7.3 Comparación de C_p vs TSR para las cinco relaciones de aspecto.

- **Ángulo de apertura.**

La elección de un ángulo de apertura de 60° se fundamenta en el rendimiento superior que tuvo en comparación con otros ángulos evaluados, incluyendo ángulos desde 30° hasta 90° con incrementos de 10° entre cada configuración. Este ángulo elegido proporciona un amplio rango de operación para el TSR y su C_p máximo es mayor entre todos los ángulos analizados. Aunque tanto el ángulo de 50° como el de 70° muestran un C_p máximo similar, el de 60° destaca al ofrecer un mejor rango de operación en comparación con el de 50° , y un C_p máximo a un TSR más bajo en comparación con el de 70° , como se puede apreciar en las Figuras 7.4 y 7.5, respectivamente [37][43].

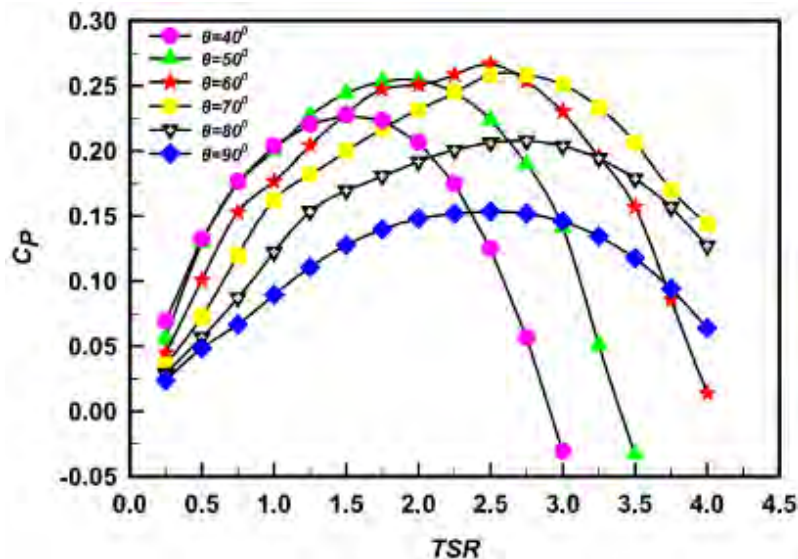


Figura 7.4 Comparación de C_p con distintos ángulos de apertura.

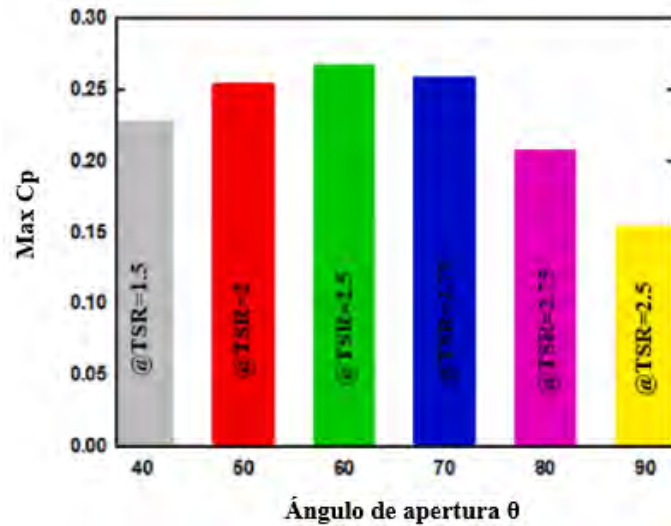


Figura 7.5 Comparación de C_p máximo con distintos ángulos de apertura.

- **Ángulo de aspas.**

A pesar de que la configuración de ángulos variables, como 30-45-60°, en un ASWT ofrece un C_p máximo mayor en comparación con la configuración de ángulos fijos, esta última presenta ventajas aprovechables en entornos urbanos. Se ha optado por seleccionar la configuración del ángulo de aspas fijo 60-60-60°, ya que es la que mejor se adapta a las exigencias y necesidades que se tiene en los entornos urbanos respecto al recurso eólico. Además, esta selección se apoya en los datos recopilados durante la caracterización previa de la base de datos del viento, procurando una adaptación adecuada a las condiciones del entorno urbano.

En 2021 Nawar *et al.* [40] compararon las configuraciones de ángulos variables contra ángulos fijos en las aspas de un rotor en espiral, donde determinaron que la configuración de ángulos variables fue superior a los ángulos fijos por un 14.7% en términos del C_p de ambas configuraciones al mismo TSR. Sin embargo, en rangos de operación con bajos TSR, ambos tuvieron un desempeño similar y en la comparación de C_p máximo la configuración de ángulos variables fue superior solo 9.18%.

Por otro lado, en el 2023 Song *et al.* [1] observaron un comportamiento similar, determinaron que la mejor configuración de ángulos variables probada, era 30-45-60° y por la parte de los ángulos fijos, la configuración 60-60-60°. Observando que los ángulos variables proporcionaban un crecimiento en el C_p máximo contra la configuración de ángulos fijos. Además, determinan que ángulos de aspa grandes en comparación con ángulos de aspa pequeños (definidos previamente en el apartado de parámetros de diseño), tienen un rango de operación TSR más amplio y un coeficiente de potencia más alto a lo largo de este rango,

como se puede observar en la Figura 7.6 siendo los colores en la gráfica azul, cian y rojo. Como se puede apreciar en la Figura 7.7, esta configuración obtuvo un coeficiente de empuje (C_T) más alto en comparación a las demás configuraciones, que al igual que la potencia, es un coeficiente adimensional que permite caracterizar el empuje del aerogenerador. Este coeficiente determina la capacidad de dispersión cuando el viento atraviesa el rotor. A velocidades más altas del viento, la estela producida aguas abajo del rotor presenta una menor dispersión. A menor velocidad para el aerogenerador es más fácil dispersar una estela. Una menor dispersión facilita que el flujo de aire recupere su dirección y velocidad [59].

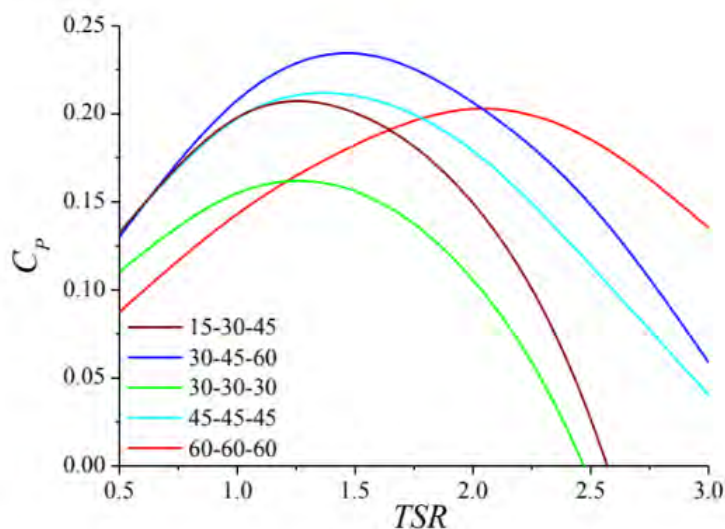


Figura 7.6 Comparación de C_p con distintos ángulos de aspa.

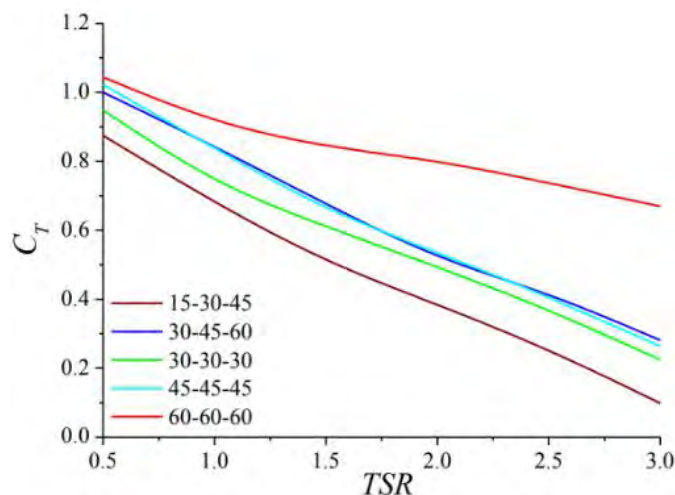


Figura 7.7 Comparación de C_T máximo con distintos ángulos de aspa.

Los ángulos de aspa pequeños permiten que las corrientes sin perturbaciones de viento pasen más fácil a lo largo de las aspas del rotor, mientras que los ángulos de aspa grandes crean un

efecto de bloqueo. Sin embargo, en la comparación de ambas configuraciones, observaron que los ángulos variables generaban vórtices en la punta de el aspa de manera más irregular, mientras que los ángulos fijos mostraron mayor estabilidad en la recuperación de la estela de los vórtices. Resultando los ángulos fijos más resistentes frente a vientos variables o turbulentos. Por lo tanto, a pesar de la ventaja en C_p máximo que ofrecen los ángulos variables, se decide sacrificar dicha ventaja por una mayor estabilidad en el rotor frente a flujos turbulentos y una menor creación de vórtices de punta de aspa que proporcionan los ángulos fijos.

La elección de diversos parámetros de diseño tienen el propósito de potenciar el rendimiento del aerogenerador ASWT, con la combinación de parámetros tales como los ángulos de las aspas, ángulo de apertura y la relación de aspecto. El objetivo es obtener las ventajas de cada elección de parámetros, buscando que en conjunto se alcance un equilibrio óptimo de rendimiento. Por ejemplo, se busca aprovechar las ventajas de los ángulos de aspa fijos, al mismo tiempo que se busca mitigar su efecto de bloqueo al flujo del aire, mediante una relación de aspecto de uno que facilite un mejor paso del flujo y se amplíe su rango de operación, así como su coeficiente de potencia.

8 Propuesta de diseño del aerogenerador ASWT.

Los parámetros seleccionados en el punto anterior sirvieron como base para realizar el diseño geométrico CAD 3D del aerogenerador ASWT propuesto, utilizando software CAD especializado. Esta herramienta permitió una visualización más precisa del modelo propuesto, mostrando los cambios implementados en comparación con las propuestas documentadas en la literatura de un aerogenerador ASWT de ángulos fijos, como se puede observar en la Figura 8.1. La proximidad y falta de distribución entre las aspas, produce el efecto de bloqueo que se mencionó en el capítulo anterior, repercutiendo en el paso del fluido a lo largo del rotor.

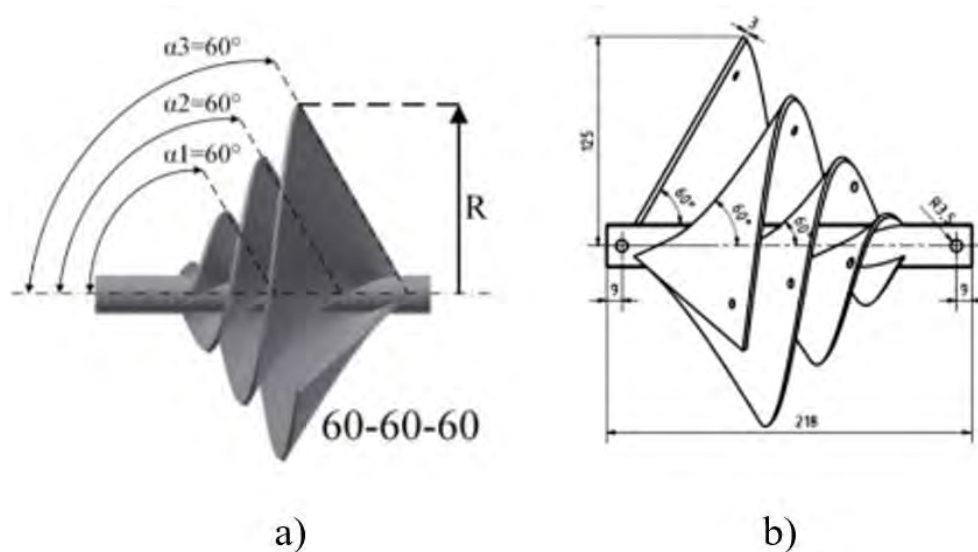


Figura 8.1 Propuestas de aerogeneradores ASWT con ángulos fijos a) Song *et al.* [1], b) Nawar *et al.* [40].

En la Figura 8.2 se destaca que en el diseño del aerogenerador ASWT propuesto en este trabajo con una configuración de ángulos fijos (60-60-60°), junto a la elongación y relación de aspecto de uno, permite una distribución más efectiva de las aspas a lo largo del rotor. Esto evita que las aspas estén demasiado cerca entre sí, esperando que mejore el flujo del fluido a lo largo del rotor. En la Figura 8.3 se observan los ángulos de 60°, radio del rotor de 125 mm y una longitud de 250 mm.

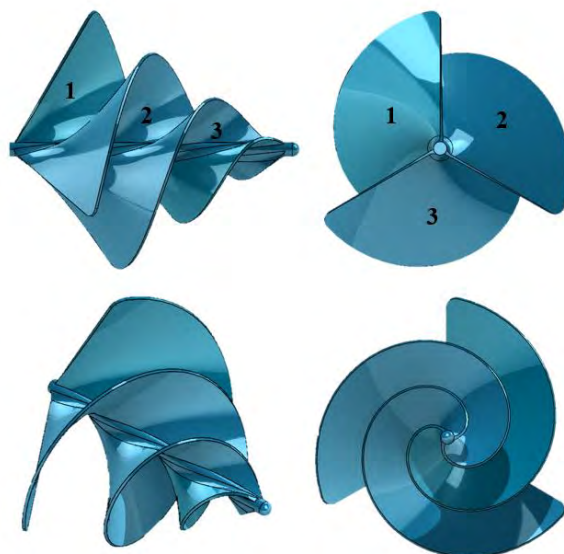


Figura 8.2 Propuesta inicial del aerogenerador ASWT con ángulos fijos.

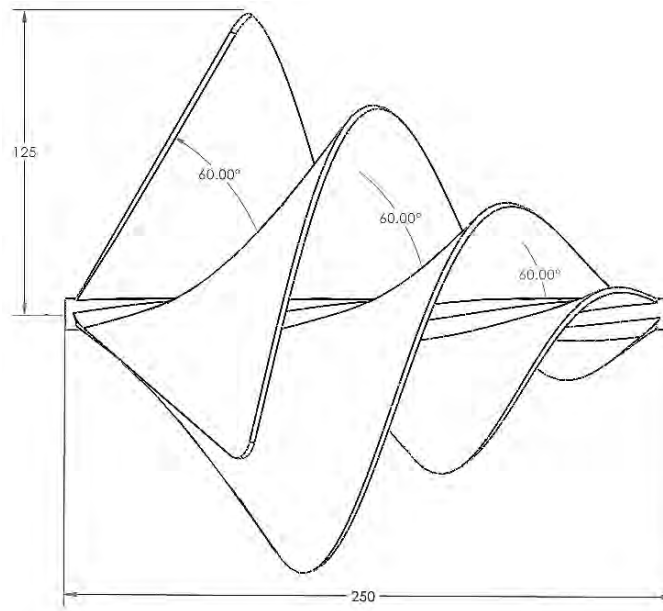


Figura 8.3 Medidas del aerogenerador ASWT propuesto.

Contar con el diseño geométrico CAD 3D del aerogenerador ASWT propuesto y los datos caracterizados del viento en una zona urbana, permite el análisis y evaluación del comportamiento del aerogenerador a través de análisis numéricos tanto de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) como de Elementos Finitos (FEM), para verificar el rendimiento del aerogenerador frente a las condiciones del viento obtenidas previamente. Esto permite evaluar si los resultados obtenidos coinciden con las expectativas derivadas de las decisiones tomadas en cuanto a los parámetros de diseño.

9 Análisis y verificación del rendimiento del diseño propuesto

9.1. Elaboración del prototipo y pruebas experimentales

Con el objetivo de realizar una primera verificación del diseño propuesto, se decidió llevar a cabo una prueba experimental básica utilizando el diseño propuesto. Esta prueba permitirá comparar su funcionamiento con respecto a un modelo de referencia reportado en la literatura.

Tomando como modelo de referencia el trabajo realizado por Nawar *et al* [40], dado que incluyen y comparan dos geometrías diferentes para el rotor, basadas en el diseño de los

ángulos de las aspas. Esta selección permite comparar el diseño propuesto con respecto a las configuraciones de: ángulos fijos y variables del rotor de referencia.

Este proceso de verificación, se inició utilizando el modelo de ángulos fijos 60° - 60° - 60° , tal como lo reportan Nawar *et al* [40]. Las dimensiones de este modelo se pueden observar en la Figura 9.1.

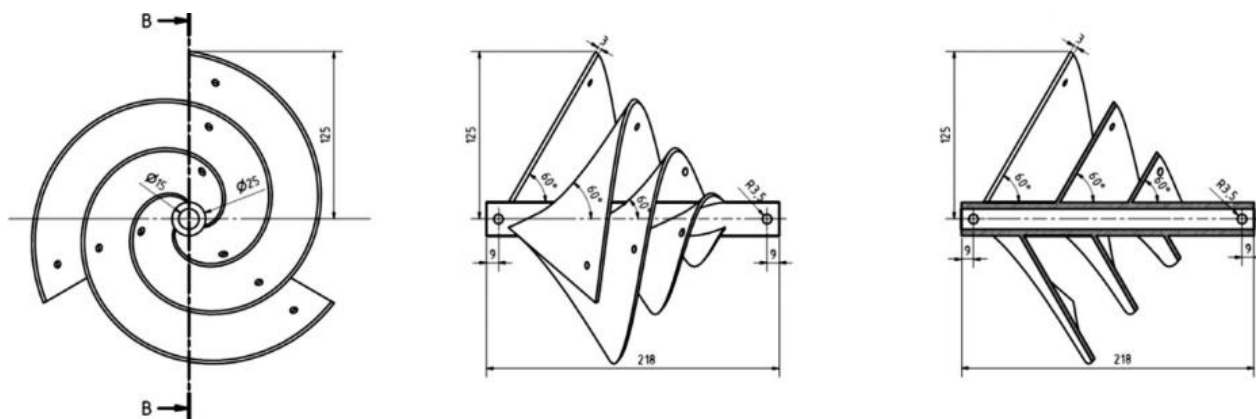


Figura 9.1. Dimensiones aerogenerador ASWT basado en la referencia [40].

Los parámetros de diseño utilizados para el desarrollo del prototipo de aerogenerador ASWT se muestran en la Tabla 9.1.

Tabla 9.1 Parámetros de diseño seleccionados para el aerogenerador propuesto.

Parámetro de diseño	Selección
Número de aspas	Tres aspas
Tipo de espiral	Espiral de Arquímedes
Relación de aspecto	Relación de aspecto de uno
Ángulo de apertura	60° para el ángulo de apertura
Ángulo de aspas	Ángulos fijos de 60°

9.1.1 Elaboración de los prototipos

El rotor del aerogenerador ASWT, fue fabricado utilizando la técnica de manufactura aditiva mediante impresión 3D, empleando PLA (Ácido Poliláctico) como material para la fabricación. Este material se seleccionó por su facilidad de procesamiento y por sus

adecuadas propiedades mecánicas, que incluyen rigidez y resistencia, esenciales para el análisis experimental del diseño. Este proceso de fabricación permitió crear con precisión las características del diseño propuesto, logrando detalles de buena calidad y una rápida producción del modelo (Figura 9.2). Posteriormente, este modelo fue utilizado en las pruebas experimentales.



Figura 9.2 Modelo del rotor del aerogenerador propuesto en impresión 3D.

El objetivo de estas pruebas fue evaluar la velocidad de giro del rotor libre en comparación con un modelo descrito en la literatura, que utiliza una configuración de ángulos fijos (Figura 9.3 (a)) y el diseño propuesto (Figura 9.3 (b)).

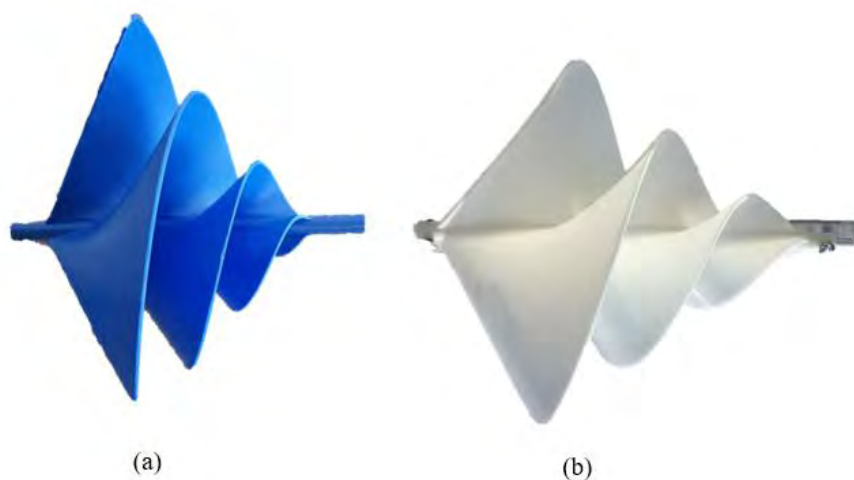


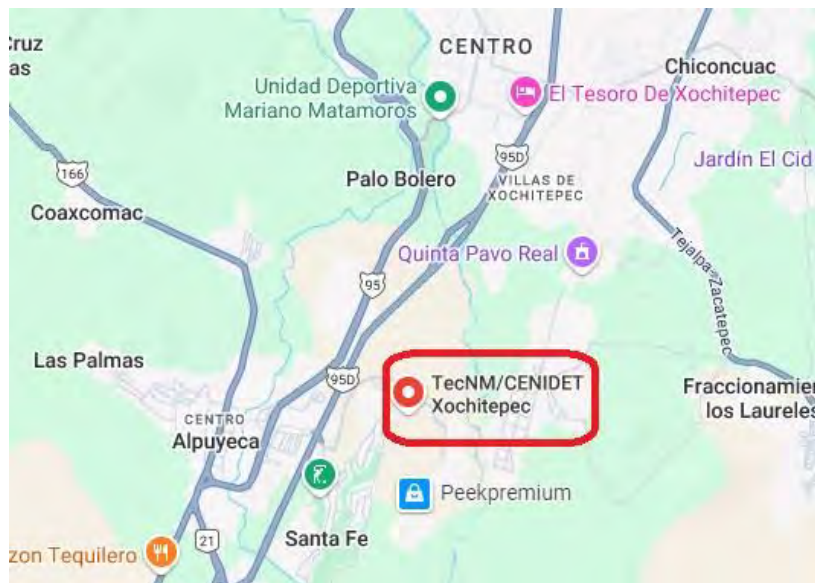
Figura 9.3 Modelos físicos de los rotores de los aerogeneradores ASWT (a) diseño reportado en la literatura con ángulos fijos, (b) diseño propuesto.

9.1.2 Prueba experimental en campo abierto

Las pruebas experimentales se realizaron en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Cenidet), en el Campus Xochitepec (ver Figura 9.4) a una altura de 1.75 metros, con una temperatura promedio de 30 °C y una humedad relativa del 52.7%. Los datos se obtuvieron mediante un anemómetro digital HT6905, que registró la velocidad del viento durante las pruebas.



(a)



(b)

Figura 9.4 (a) Pruebas experimentales en el Cenidet Campus Xochitepec (b) Ubicación del Cenidet Campus Xochitepec.

La velocidad angular del rotor se midió utilizando un tacómetro digital por contacto DT-6236C.

La prueba experimental, para ambos diseños se realizó a la misma altura, como se puede observar en la Figura 9.5.



Figura 9.5 Pruebas experimentales de ambos diseños de rotor del aerogenerador ASWT.

Durante las pruebas, se observó que el diseño de referencia del aerogenerador requería una mayor velocidad y fuerza del viento para poder operar. En contraste, el diseño del aerogenerador propuesto iniciaba el giro con mayor facilidad y mantenía su rotación durante más tiempo. Las velocidades de giro alcanzadas por cada rotor se detallan en la Tabla 9.2, donde se observa que el diseño propuesto requiere una velocidad del viento 31.5% menor para poder romper su inercia y comenzar a girar en comparación con el diseño de referencia. Además, las velocidades de giro máximas y mínimas del diseño propuesto fueron un 21.8% y un 45.4% mayores, respectivamente, en relación con el diseño de referencia.

Las velocidades del viento para cada prueba se pueden observar en las Figuras 9.6 y 9.7, mientras que las velocidades de giro registradas para cada caso se presentan en las Figuras 9.8 y 9.9.

Tabla 9.2 Resultados de prueba experimental de ambos aerogeneradores ASWT.

	Diseño propuesto	Diseño de referencia	Porcentaje de cambio (%)
Velocidad del viento (m/s)	1.57	2.28	-31.5
Velocidad de giro máxima (rpm)	224.6	184.4	21.8
Velocidad de giro mínima (rpm)	71.5	49.1	45.4



Figura 9.6 . Prueba del rotor de referencia y medición de la velocidad del viento.



Figura 9.7 . Prueba del rotor propuesto y medición de la velocidad del viento.



Figura 9.8 . Velocidad de giro del rotor de referencia.



Figura 9.9 . Velocidad de giro del rotor propuesto.

9.1.3 Prueba experimental en túnel de viento

Se realizaron pruebas en un entorno controlado utilizando el túnel de viento del Departamento de Ingeniería Mecánica del TecNM/Cenidet. El objetivo principal fue observar y comparar el comportamiento de ambos modelos: el modelo de referencia y el modelo propuesto en el presente proyecto de tesis, como se muestra en la Figura 9.10.



Figura 9.10 . Modelos físicos de los rotores de aerogeneradores ASWT para las pruebas en túnel de viento: (a) diseño reportado en la literatura con ángulos fijos; (b) diseño propuesto.

Como primera etapa, se caracterizó la velocidad del viento generada por el túnel en función del porcentaje de potencia suministrada al motor. Para ello, se registraron datos de la velocidad del flujo a distintos niveles de potencia, desde un mínimo del 5% hasta un máximo del 40%. Con esta información se elaboró la gráfica mostrada en la Figura 9.11.

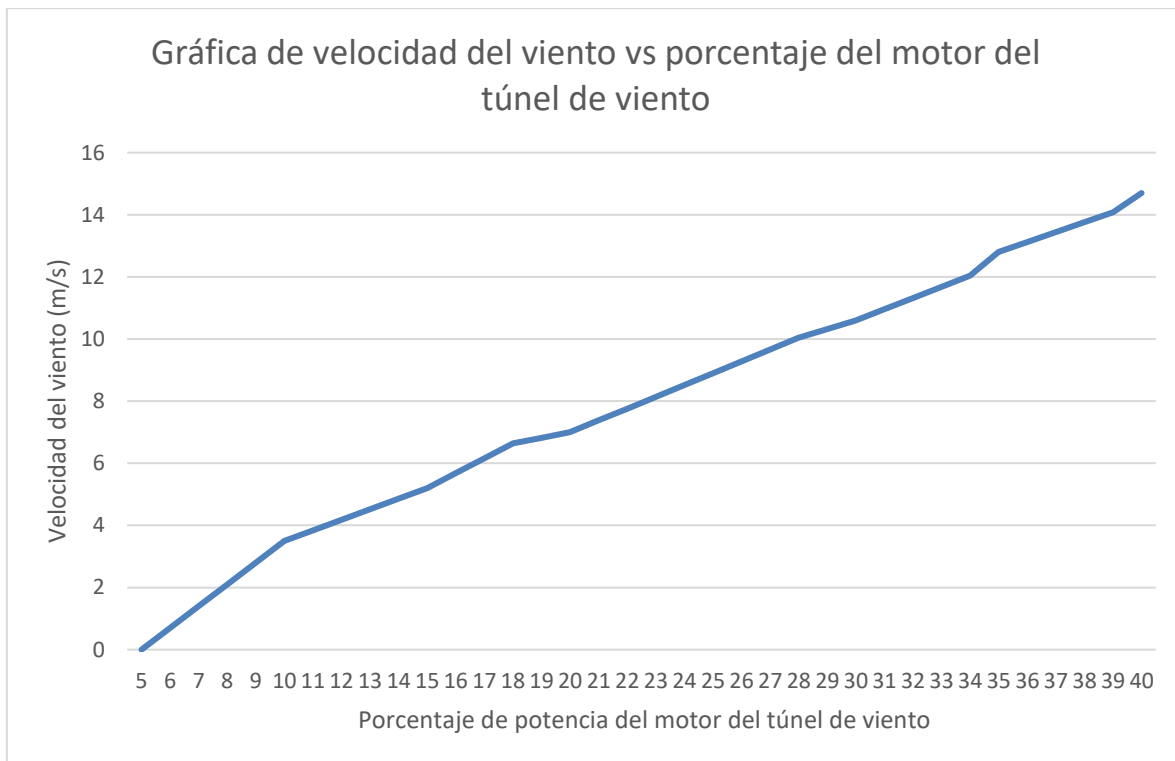


Figura 9.11 . Relación entre la velocidad del viento y el porcentaje de potencia del túnel de viento.

Una vez establecida la relación entre la potencia del motor y la velocidad del flujo, se procedió a colocar ambos modelos en el túnel de viento, sometiéndolos a diferentes velocidades. La variable de comparación fue la velocidad de rotación del rotor, medida en revoluciones por minuto (RPM).

En la Figura 9.12 se presenta el comportamiento de ambos modelos. La línea de color azul corresponde al modelo propuesto, el cual inició su operación a una velocidad del viento de 0.7 m/s, mientras que el modelo de referencia requirió 2.1 m/s para comenzar su rotación. Este resultado demuestra la mayor capacidad del modelo propuesto para operar a velocidades de viento más bajas. Sin embargo, a una velocidad de 4.52 m/s, ambos modelos alcanzaron velocidades de giro similares, aunque el modelo de referencia mostró una mayor inestabilidad estructural en su base, en comparación con el modelo propuesto.

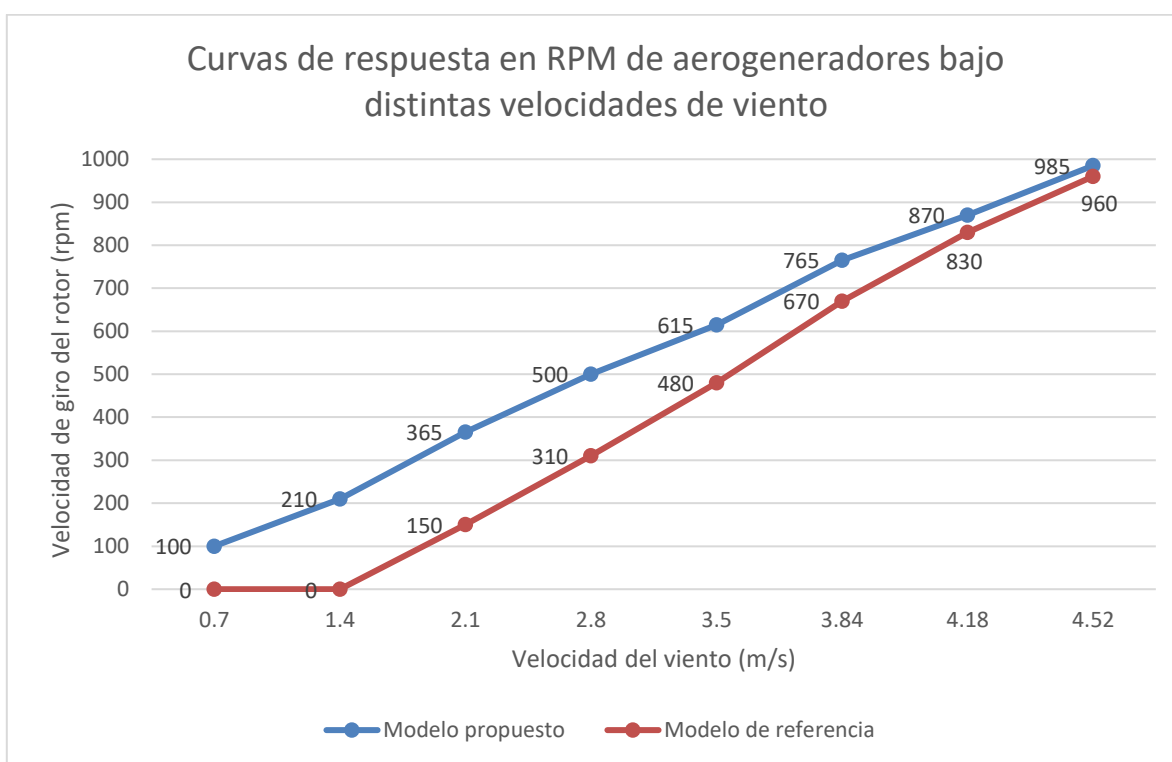


Figura 9.12 . Comportamiento de los modelos ASWT a diferentes porcentajes de potencia del túnel de viento.

Los resultados experimentales indican que el modelo propuesto presenta una ventaja significativa en el arranque a bajas velocidades de viento, lo que lo hace potencialmente más eficiente en entornos con recursos eólicos limitados. Además, el modelo propuesto demostró una mayor estabilidad estructural frente a velocidades moderadas, lo que sugiere un mejor desempeño y mayor confiabilidad bajo condiciones operativas variables.

La prueba experimental permitió observar, en primera instancia, cómo la modificación geométrica del rotor influye en el desempeño del aerogenerador ASWT. Los resultados mostraron que las variaciones en la forma y el ángulo de las aspas en espiral impactan de manera significativa en el funcionamiento del aerogenerador.

El modelo propuesto ha demostrado una mayor facilidad para iniciar su operación a bajas velocidades del viento en comparación con el modelo de referencia de ángulos fijos. Se observa que, con ciertos ajustes en su geometría, el diseño del aerogenerador puede adaptarse a entornos más específicos, considerando parámetros como las velocidades del viento y la intensidad de turbulencia del sitio.

9.2. Verificación numérica de un caso de estudio reportado en la literatura

Con la finalidad de fortalecer la base teórica, identificar las posibles limitaciones de la investigación propuesta, contextualizar los resultados previos en la literatura y desarrollar un proceso de simulación numérica válido, se llevó a cabo la verificación de un caso de estudio numérico reportado en la literatura. Este enfoque tuvo como objetivo confirmar la veracidad y la reproducibilidad de los hallazgos del estudio original, que sirvieron como base para la metodología aplicada en la evaluación del diseño propuesto del aerogenerador ASWT.

El proceso de verificación se inició utilizando el modelo del aerogenerador ASWT con ángulos fijos 60°-60°-60°, reportado por Nawar *et al* [40], el cual fue empleado en las pruebas experimentales mencionadas previamente.

Para el análisis numérico, se utilizó el software ANSYS Fluent en su versión estudiantil. El modelado CFD es fundamental para describir el movimiento y comportamiento de un fluido, y se realiza mediante la resolución de las ecuaciones RANS (Reynolds Average Navier Stokes) [64]. En este caso, la solución de las ecuaciones RANS se obtiene de manera que un campo de velocidad representa la velocidad de un fluido en un punto específico en el tiempo y espacio. El flujo de gases se considera incompresible si el cambio de densidad es inferior al 5% de la densidad inicial, o si el número de Mach es inferior a 0.3. El número de Mach se define como la relación entre la velocidad del fluido (V) y la velocidad del sonido en el fluido (c), como se puede muestra en la Ec. 9.1 [65].

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (9.1)$$

Por lo tanto, la ecuación de continuidad de este flujo depende únicamente del término de velocidad, como se describe en la Ec. 9.2. En cambio, el termino de presión se incluye en la ecuación de *momentum*, que se presenta en la Ec. 9.3. Para obtener los resultados de presión,

se emplea una metodología que utiliza cantidades discretas en las ecuaciones de momento y de continuidad, las cuales se resuelven simultáneamente.

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (9.2)$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_j} \quad (9.3)$$

Donde:

Los ejes cartesianos están representados por los subíndices $i=1, 2$ y 3 .

ρ , es la densidad del fluido.

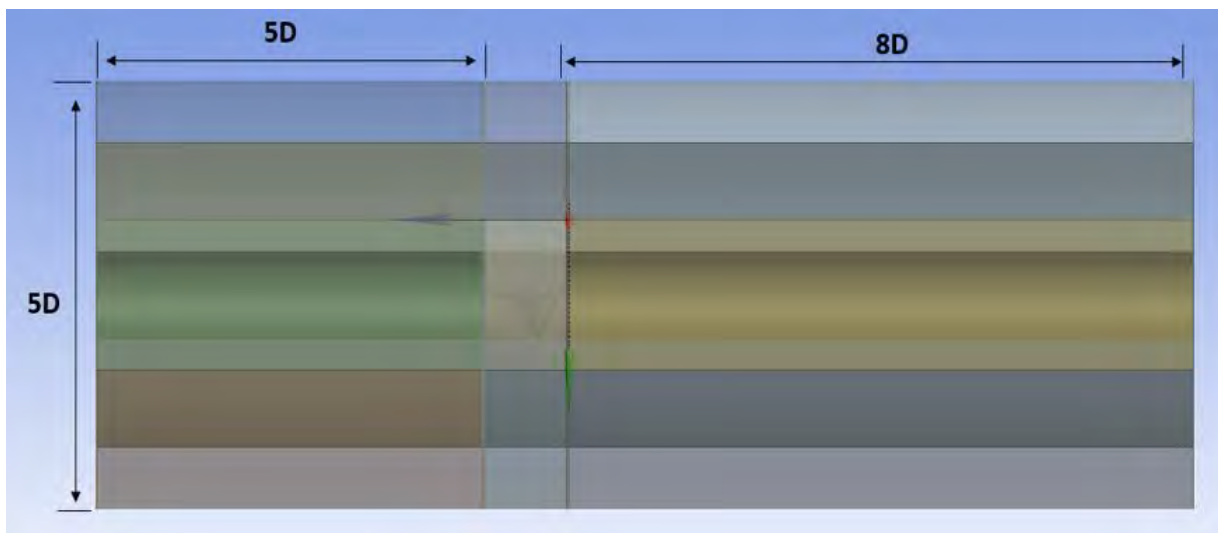
U_i y U_j , representan los vectores de velocidad en las direcciones i y j .

p , es la presión del fluido.

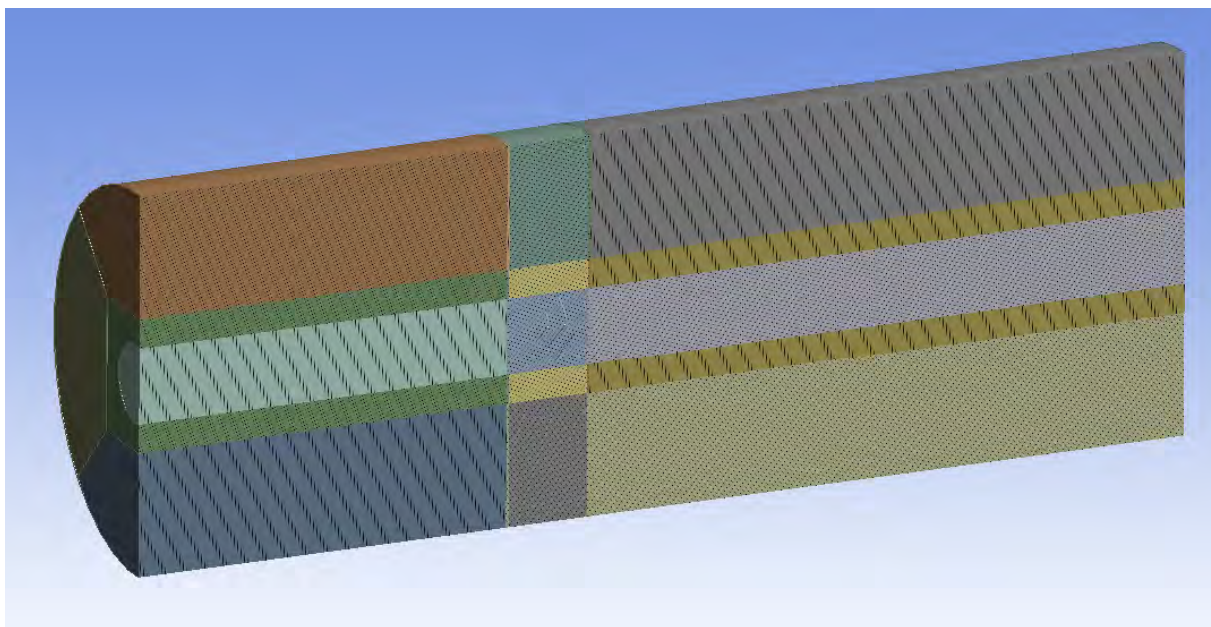
ν , es la viscosidad cinemática del fluido.

$\bar{U}_i \bar{U}_j$, se define como el tensor de Reynolds, que representa las tensiones causadas por las fluctuaciones del fluido.

El proceso de simulación comenzó con la introducción de la geometría del aerogenerador en un dominio computacional cilíndrico, tal como se ha reportado en la literatura [40][41][43]. Este dominio tiene un diámetro cinco veces mayor que el diámetro del aerogenerador (0.25 m), e incluye una sección estacionaria que se extiende cinco veces el diámetro del aerogenerador aguas arriba, seguida de un dominio rotatorio. La segunda parte del dominio estacionario se define con una distancia de ocho veces el diámetro del aerogenerador aguas abajo. Con el objetivo de mejorar la calidad de la malla, se realizaron ajustes geométricos a lo largo del dominio computacional, sin que esto afectara los dominios estacionarios ni el dominio rotatorio, como se muestra en la Figura 9.13.



(a)

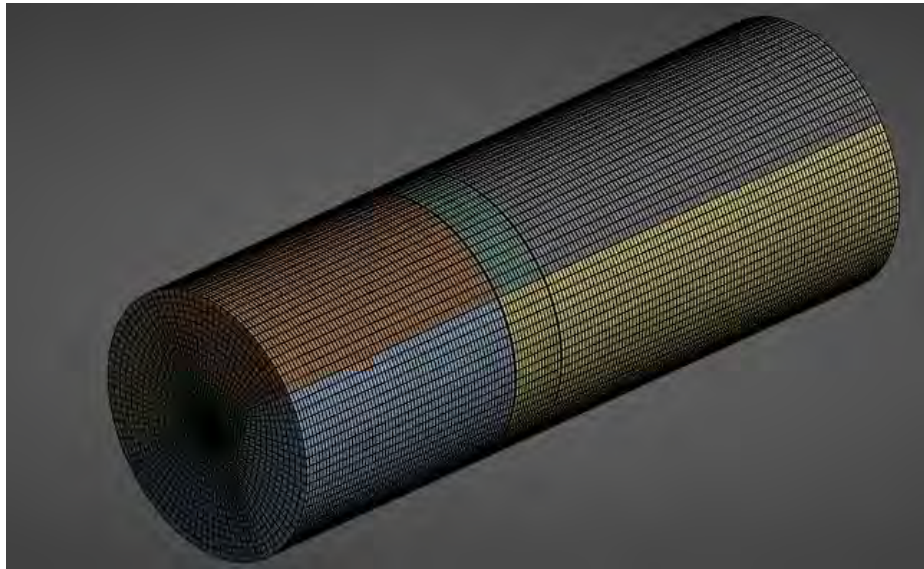


(b)

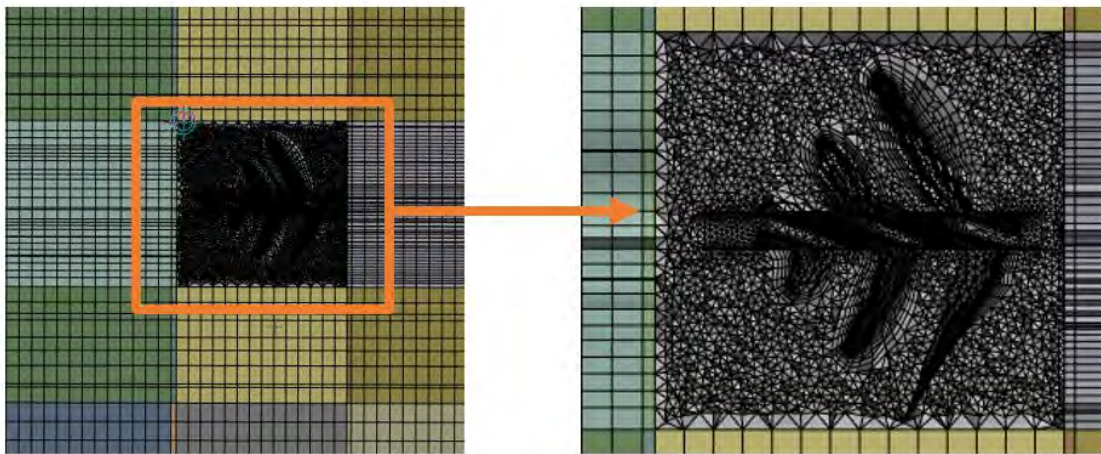
Figura 9.13. Dominio computacional del aerogenerador ASWT de referencia: (a) Dimensiones (b) Vista de sección.

9.2.1 Análisis de sensibilidad de malla CFD

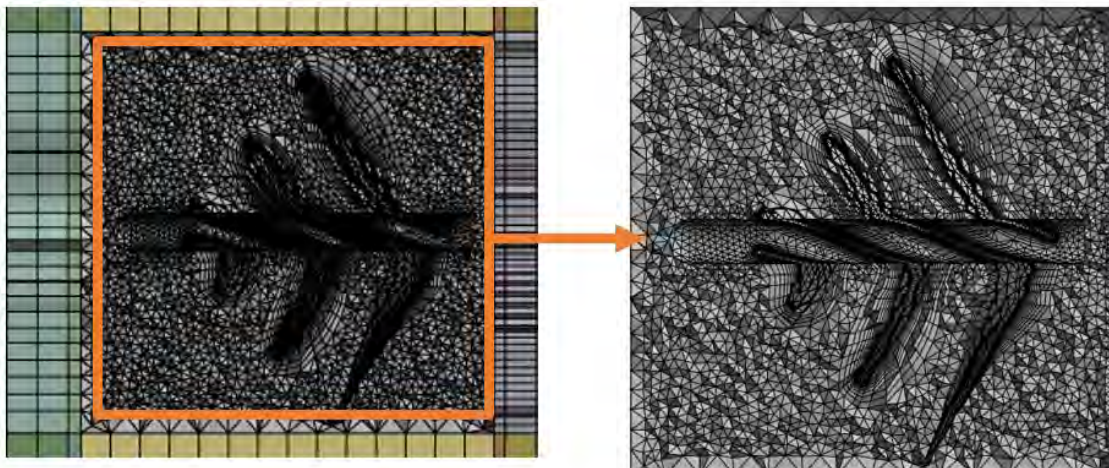
Una vez definido el dominio computacional para el análisis numérico, se procedió a generar la malla o discretización del modelo, empleando una combinación híbrida de elementos hexaédricos y tetraédricos, como se ilustra en la Figura 9.14 (a). Se realizó un refinamiento de la malla en la zona del dominio rotario, donde se encuentra la geometría del aerogenerador, la cual se muestra en la Figura 9.14 (b). Con la finalidad de mejorar la precisión de los resultados, se utilizó la técnica de inflación de subcapas [66] alrededor del rotor, siguiendo las recomendaciones del artículo de referencia [40], que sugiere el uso de 15 capas con una tasa de crecimiento de 1.2. Este enfoque tiene como objetivo obtener resultados más precisos en cuanto a la presión y los gradientes de velocidad cerca de la superficie del rotor, como se puede observar en la Figura 9.14 (c).



(a) Malla del dominio computacional.



(b) Malla dominio rotatorio.



(c) Inflación de subcapas alrededor de las aspas del rotor.

Figura 9.14. Malla utilizada para el dominio computacional del aerogenerador ASWT de referencia.

El uso de una malla híbrida con elementos hexaédricos y tetraédricos es fundamental para mejorar tanto la eficiencia como la precisión de los cálculos numéricos. La cantidad y calidad de la malla tienen un impacto significativo en los resultados finales, ya que una malla fina suele generar resultados más precisos, a costa de un mayor consumo de recursos y tiempo computacional [67][68]. Se utilizaron un total de siete mallas con diferentes números de elementos, con el objetivo de analizar las variaciones en los resultados entre cada una de ellas, hasta determinar una malla que sea capaz de capturar el fenómeno de una forma precisa con un tiempo de cómputo bajo. Para ello, se priorizó tener la mayor cantidad de elementos posibles en el dominio rotatorio, manteniendo una configuración consistente entre las siete mallas. En la Tabla 9.3 se presentan los números de elementos para cada malla, siendo el coeficiente de potencia (C_p) la variable de comparación. Este coeficiente se define como la relación entre la potencia generada por el aerogenerador y la potencia disponible en el flujo del viento que atraviesa el rotor, como se describe en la Ec. 9.4 [55].

$$C_p = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho U^3 A} = \frac{\text{Potencia del Rotor}}{\text{Potencia en el viento}} \quad (9.4)$$

Donde:

T = Torque del rotor.

ω = Velocidad angular del rotor.

ρ = Densidad del fluido.

A = Área de barrido del rotor.

U = Velocidad de entrada del flujo.

Tabla 9.3 Análisis de independencia de malla.

	Número de elementos en el dominio rotatorio	Número de elementos en el dominio estacionario	Número total de elementos	Coeficiente de Potencia
1	179,440	386,622	566,062	0.253
2	210,985	473,696	684,681	0.261
3	261,350	473,706	735,056	0.26
4	346,572	482,358	828,930	0.259
5	492,653	482,358	975,011	0.256
6	755,995	214,580	970,575	0.253
7	882,073	163,745	1,045,818	0.252

En la Figura 9.15 se muestra el comportamiento del coeficiente de potencia a medida que se refina la malla en diversas iteraciones, incrementando el número de elementos. Este refinamiento se enfoca principalmente en la zona del dominio rotatorio, donde se encuentra el ASWT, con el objetivo de obtener una mayor densidad de elementos en dicha área.

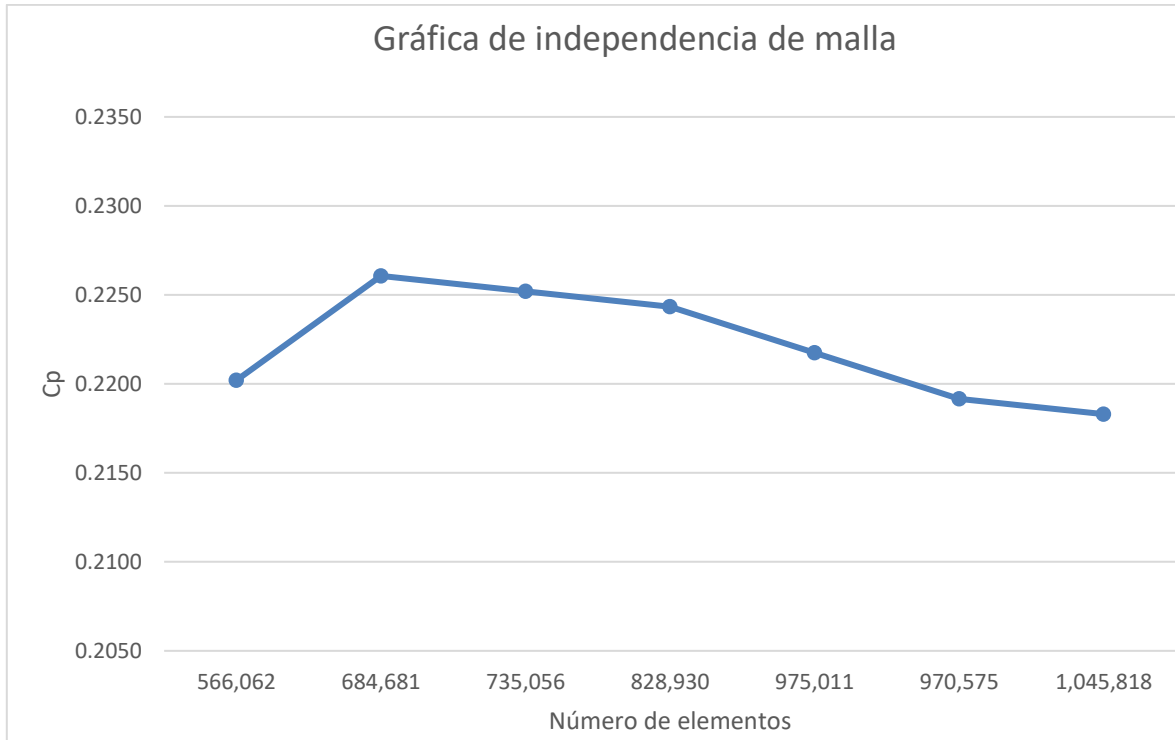


Figura 9.15. Análisis de independencia de malla para las simulaciones CFD.

9.2.2 Condiciones de frontera

Una vez generada la malla, se procedió a configurar la simulación, estableciendo las condiciones de frontera de acuerdo con lo indicado en el artículo de referencia, con la finalidad de evaluar el sistema en las mismas condiciones. Para ello, se utilizó una velocidad de entrada de 8 m/s y se definió la presión atmosférica como salida del sistema. En cuanto al modelo de turbulencia y para calcular el componente de velocidad fluctuante a lo largo del dominio, se empleó el modelo de turbulencia SST $k-\omega$, donde k representa la energía cinética turbulenta y ω la tasa de disipación de esta energía. Este modelo fue seleccionado debido a su buen desempeño en las capas límites cercanas a la pared y su capacidad para predecir la separación del flujo, siendo recomendado para aplicaciones aerodinámicas como los aerogeneradores ASWT, según estudios previos [69].

No obstante, dado que no se disponía de todos los datos de entrada del sistema, se utilizó la ecuación de relación de velocidad punta (TSR, por sus siglas en inglés) para determinar la velocidad de giro del aerogenerador. Este cálculo se realizó a partir de los datos disponibles, como el radio y la velocidad del viento, considerando que los resultados obtenidos por los autores del artículo de referencia, corresponden a un TSR de 2.

$$TSR = \frac{\omega R}{U} \quad (9.5)$$

Donde:

TSR = Relación de velocidad punta (*Tip Speed Ratio*).

ω = Velocidad angular.

U = Velocidad entrada del flujo.

R = Radio del rotor.

Despejando ω se obtiene:

$$\omega = \frac{TSR * U}{R} \quad (9.6)$$

Para determinar el paso de tiempo adecuado para el proceso de simulación, se utilizó el número de Courant, el cual representa la relación entre la velocidad del fluido y el tiempo de residencia en una celda [70]. Este número es fundamental para la convergencia de la simulación, y se recomienda que su valor no sea mayor a uno. La ecuación que define este número es la siguiente:

$$C = \frac{U \Delta t}{\Delta x} \quad (9.7)$$

Donde:

C = Número de Courant.

U = Velocidad entrada del flujo.

Δt =Paso de tiempo en la simulación.

Δx = Tamaño de la malla o distancia entre puntos en la malla.

Conociendo los datos de la velocidad del flujo, el tamaño de la malla y un número de Courant adecuado, se determinó el paso del tiempo de la simulación, a partir de la Ec. 9.8.

$$\Delta t = \frac{C \Delta x}{U} \quad (9.8)$$

Las condiciones de frontera y los parámetros de simulación utilizados se resumen en la Tabla 9.4, y su aplicación se ilustra en la Figura 9.16.

Tabla 9.4 Configuración de los parámetros de la simulación.

Parámetro	Descripción
Dominio de flujo	Dominio cilíndrico
Tipo de malla	Hexaédrica/Tetraédrica
Número de elementos	1,045,818
Material (Fluido)	Aire
Modelo de turbulencia	<i>Shear Stress Transport</i> (SST) $k-\omega$
Entrada	Velocidad del viento (8 m/s)
Salida	Presión atmosférica
Criterio de convergencia	1×10^{-6}

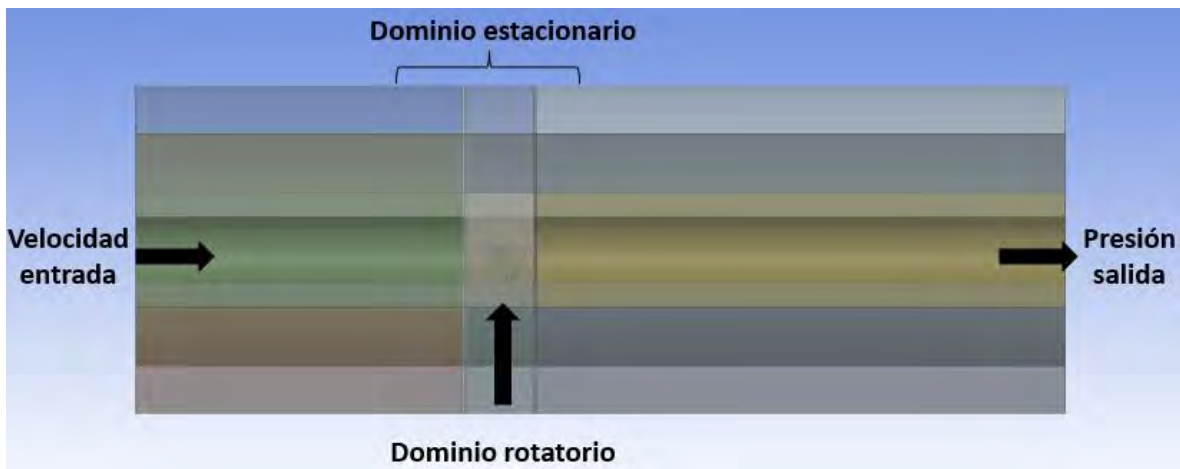


Figura 9.16. Condiciones de frontera para el aerogenerador ASWT de referencia.

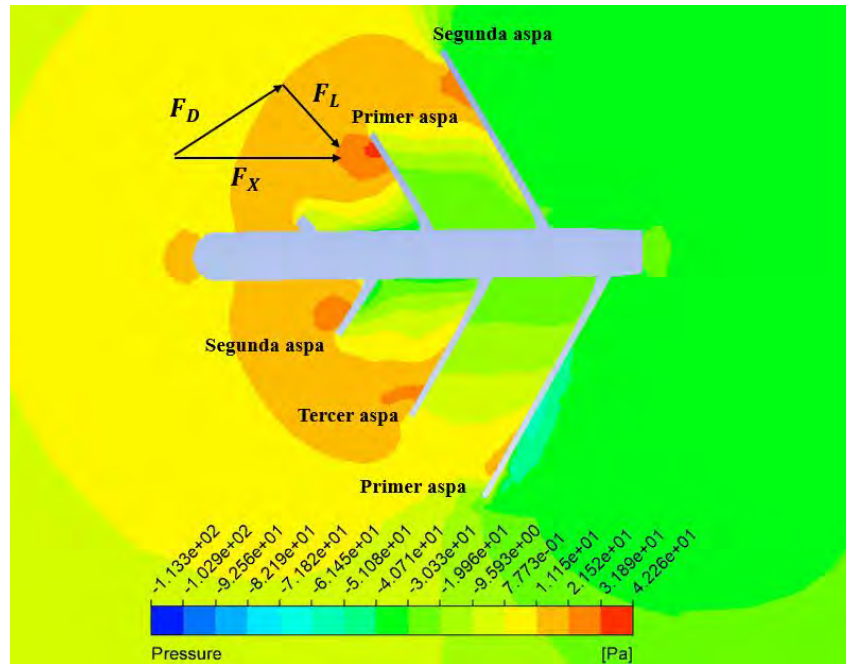
Existe una diferencia entre el estudio original y la verificación realizada en este trabajo en cuanto al número de elementos en la malla. El estudio original utilizó 1,635,500 elementos, mientras que, debido a las restricciones impuestas por el uso de una licencia estudiantil y las limitaciones del recurso computacional disponible, esta investigación se restringió a 1,045,818 elementos.

9.2.3 Análisis de resultados

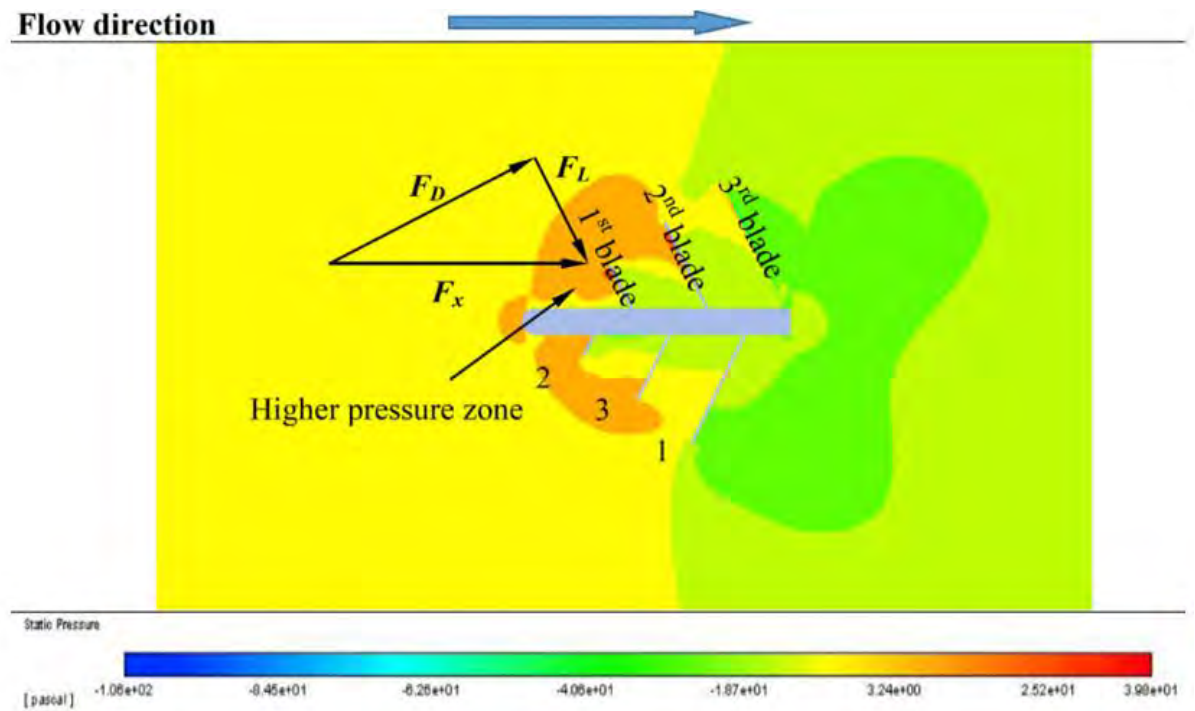
En los resultados reportados por Nawar *et al.* [40], se ilustra gráficamente la distribución de presiones a lo largo de la superficie del aerogenerador, como se muestra en la Figura 9.17 (b). Por su parte en la Figura 9.17 (a) se presentan los resultados preliminares obtenidos en este trabajo de verificación.

Entre las observaciones realizadas, se constató que la distribución de presión en el modelo original reportado en la literatura y la verificación es similar. Se identificaron las zonas de alta presión localizadas en la primera aspa y en las puntas de las aspas posteriores, mientras que se registraron zonas de menor presión en la parte trasera de las aspas. Resaltando que existió una mejora en los resultados preliminares del caso de verificación realizados anteriormente, teniendo una mayor correspondencia cualitativamente como cuantitativamente. Teniendo para el trabajo de verificación se obtuvo una presión máxima de 42.26 Pascales, mientras que el trabajo de referencia reporta una presión máxima de 39.8.

La alta presión genera una fuerza (F_x) paralela al eje de rotación y en la dirección que lleva el flujo. Esta fuerza se divide en dos componentes: la fuerza de arrastre (F_D) y la fuerza de sustentación (F_L), las cuales en conjunto forman el triángulo de fuerzas, siendo una herramienta visual que ayuda a entender y analizar las fuerzas que actúan sobre las aspas y la estructura del aerogenerador.



(a)



(b)

Figura 9.17. Distribución de presiones en la superficie del aerogenerador (a) Verificación (b) Referencia.

En la Figura 9.18 se presenta una comparación cualitativa de la distribución de presiones para ambos casos analizados. Por su parte, la Figura 9.19 muestra la distribución de velocidades en la superficie del rotor para los mismos casos estudiados. Se observa una zona de baja velocidad del viento en la parte trasera del rotor, mientras que las zonas de mayor velocidad se localizan entre la parte posterior de la primera aspa y la parte delantera de la segunda aspa, así como entre la segunda y tercera aspa. En cuanto a los valores de velocidad máxima, para el trabajo de verificación es de 28.01 m/s, mientras que el trabajo de referencia reporta una velocidad máxima de 28.30 m/s.

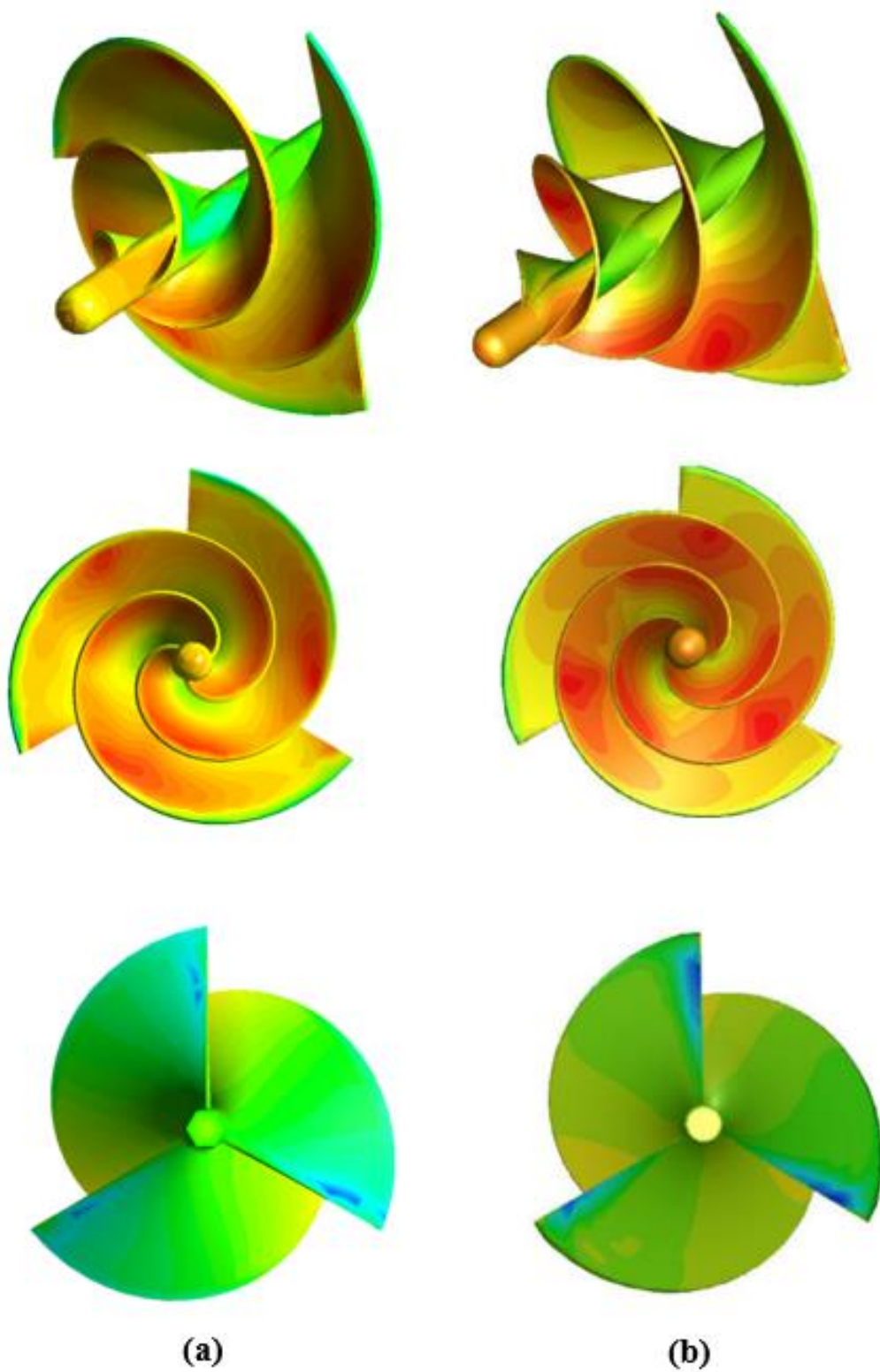


Figura 9.18. Distribución de presiones sobre el aerogenerador (a) Verificación (b) Referencia.

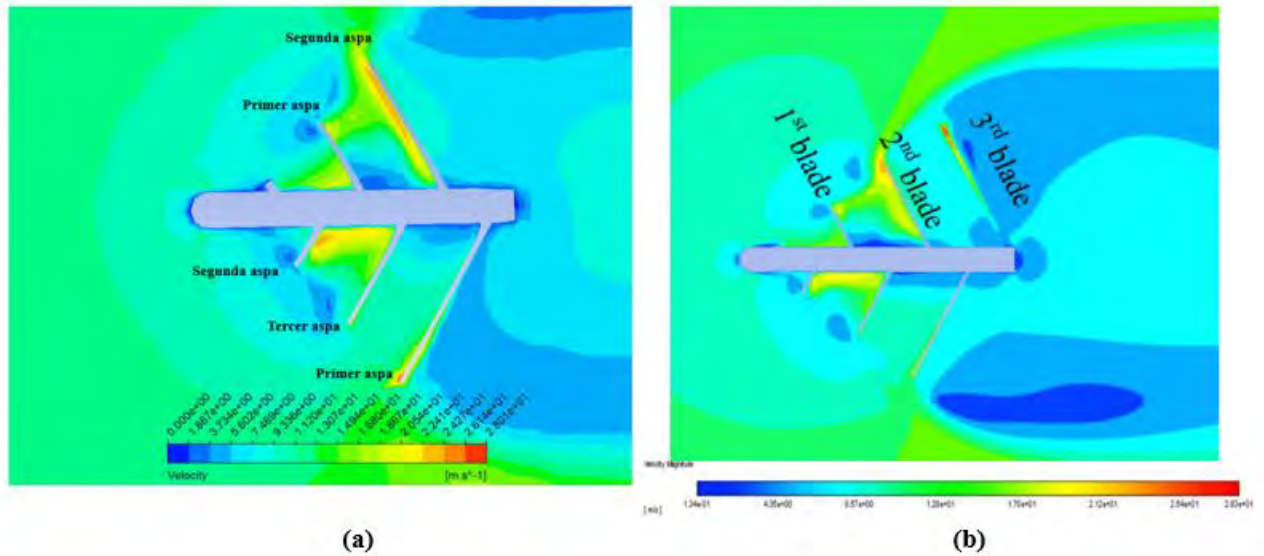


Figura 9.19. Distribución de velocidades sobre la superficie del aerogenerador a) Verificación b) Referencia.

Por otro parte, se presentan los datos de torque y del coeficiente de torque, el cual se define mediante la siguiente ecuación:

$$C_Q = \frac{4T}{\rho A U^2 D} \quad (9.9)$$

Donde:

T = Torque.

ρ = Densidad del fluido.

A = Área de barrido del rotor.

U = Velocidad entrada del fluido.

D = Diámetro del rotor.

En la Tabla 9.5 se muestra una comparación de los resultados reportados en el artículo de referencia y los resultados obtenidos en la simulación de verificación, en términos de torque y coeficiente de torque.

Tabla 9.5 Comparación de resultados obtenidos referentes al torque.

Parámetro	Valor reportado por Nawar <i>et al.</i> [40]	Valor obtenido en la verificación
Torque	0.04096 N·m	0.04517 N·m
Coefficiente de Torque	0.17034	0.1878

De los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas, se observa que el valor obtenido para el torque se aproxima a los resultados reportados en el estudio original. En general, los resultados obtenidos en este trabajo de verificación no presentaron diferencias significativas. En cuanto a la presión máxima, en el trabajo de verificación se obtuvo un valor superior, con una diferencia del 6.18%, mientras que la velocidad máxima mostró una diferencia del 3.08%. Por otro lado, el torque y el coeficiente de torque fueron las variables que mostraron las mayores diferencias porcentuales, con 10.26% y 10.25%, respectivamente. Estos datos se pueden consultar en la Tabla 9.6.

Tabla 9.6 Porcentajes de diferencia entre el trabajo de referencia y el de verificación.

Variable	Porcentaje de diferencia
Presión máxima	6.18%
Velocidad máxima	3.08%
Torque	10.26%
Coefficiente de Torque	10.25%

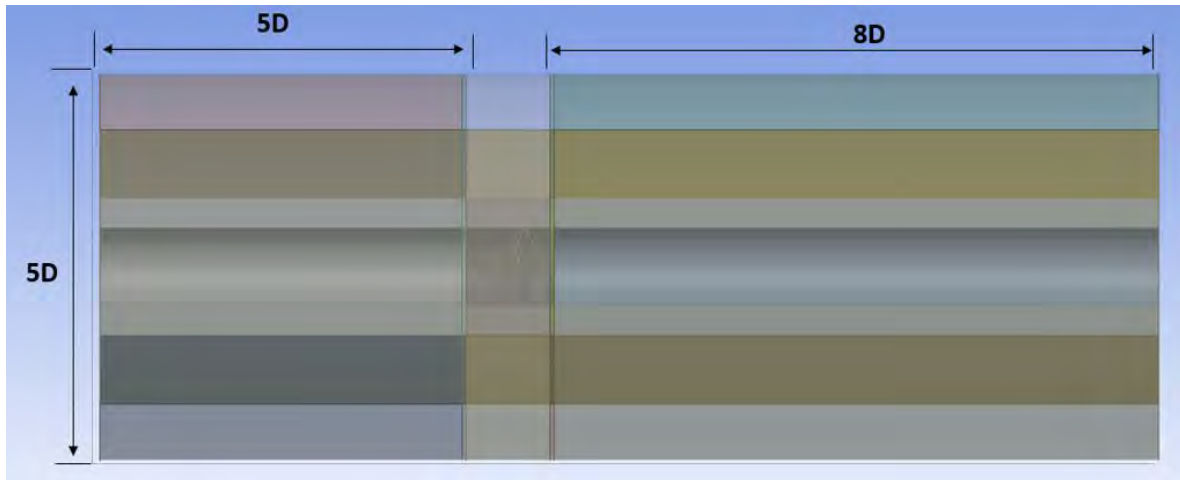
A pesar de las limitaciones previamente mencionadas, como la licencia del software y los recursos computacionales disponibles, se logró realizar un trabajo de verificación que no solo permitió corroborar los resultados obtenidos por los autores, sino también obtener un primer acercamiento al uso de un software CFD (Dinámica de Fluidos Computacional), así como comprender su funcionamiento y el comportamiento de este tipo de aerogeneradores ASWT.

9.3. Estudio numérico de modelo propuesto

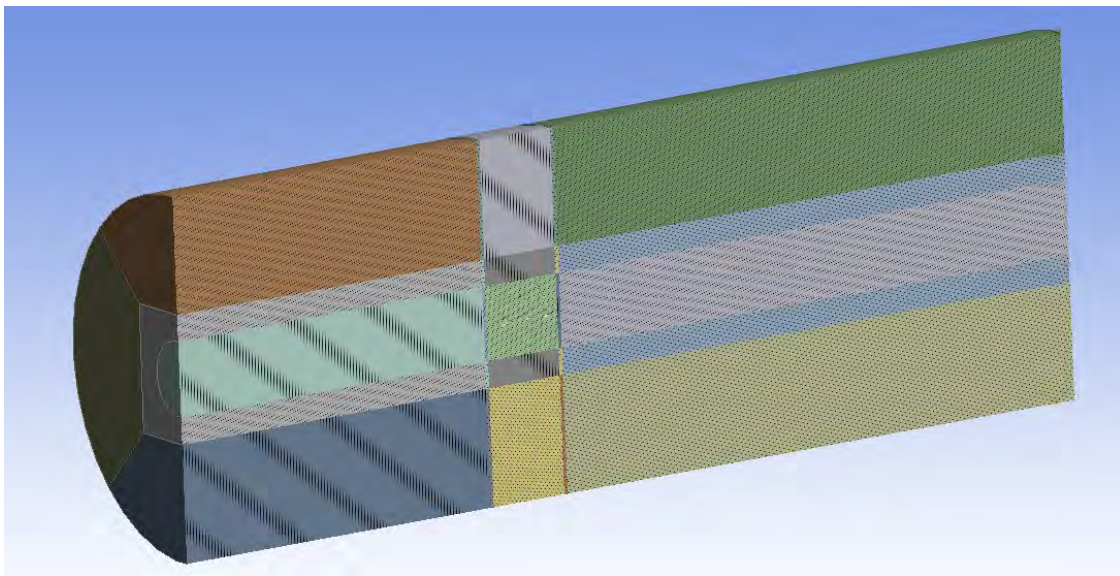
Una vez verificado el modelo reportado en la literatura, se procedió a realizar las primeras pruebas numéricas del diseño del aerogenerador inicial propuesto. Para facilitar una comparación inicial entre ambos modelos bajo las mismas condiciones, se utilizó el mismo dominio computacional empleado en el modelo de Nawar *et al* [40].

El diseño del aerogenerador ASWT propuesto mantiene el mismo diámetro que el modelo del artículo de referencia, por lo que se conservaron las dimensiones del dominio computacional, salvo de un ajuste en el dominio rotatorio. Este ajuste fue necesario debido a que el diseño propuesto cuenta con una relación de aspecto de uno, lo que hace que su

longitud sea ligeramente mayor. El dominio computacional modificado se muestra en la Figura 9.20.



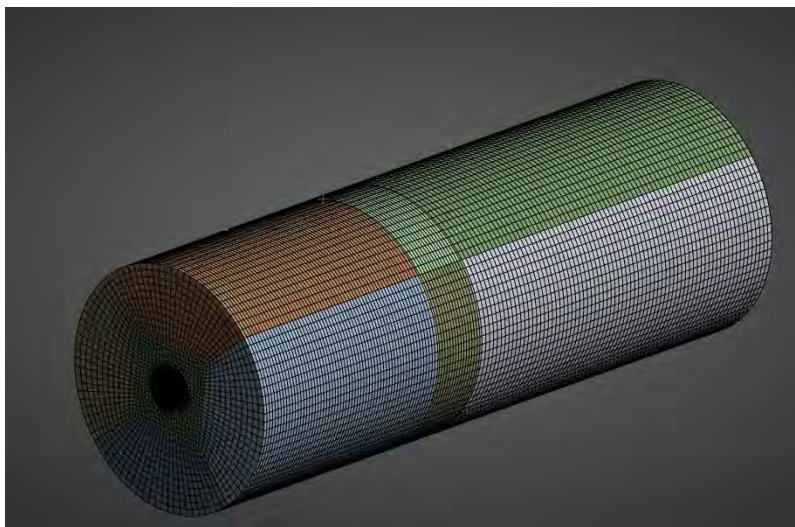
(a)



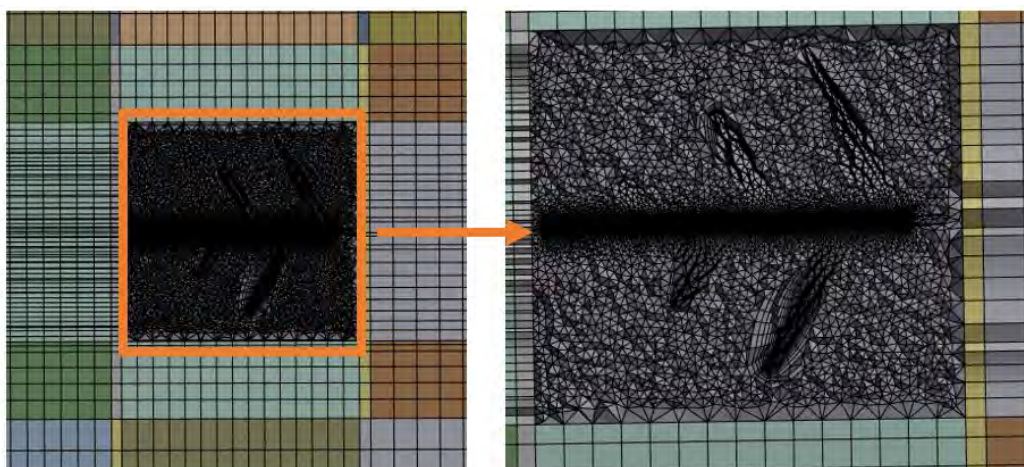
(b)

Figura 9.20. Dominio computacional del aerogenerador ASWT propuesto: (a) Dimensiones (b) Vista de sección.

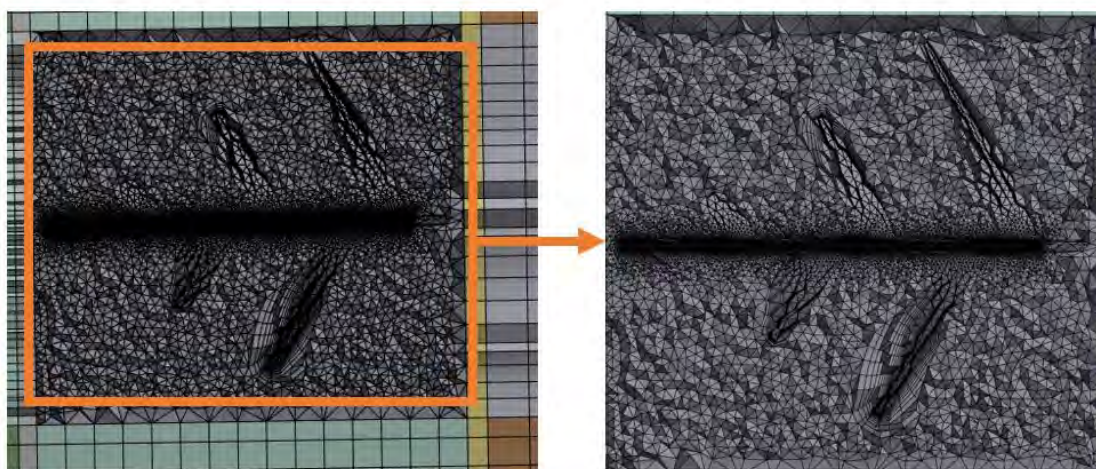
Al igual que en el proceso de mallado del modelo de referencia, en este modelo se utilizaron las mismas técnicas de mallado, empleando la herramienta de inflación de subcapas con la misma configuración que en el modelo anterior, como se puede observar en la Figura 9.21.



(a) Malla del dominio computacional.



(b) Malla dominio rotatorio.



(c) Inflación de subcapas alrededor de las aspas del rotor.

Figura 9.21. Malla utilizada para el dominio computacional del modelo propuesto.

El sistema del modelo propuesto cuenta con un total de 971,472 elementos. Este incremento se debe al aumento en la longitud del rotor del aerogenerador en este modelo. En cuanto a las condiciones de frontera, se mantuvieron sin cambios para asegurar que la comparación se realizara bajo las mismas condiciones.

La Figura 9.22 se muestra la distribución de presiones para ambos casos, el modelo de verificación y el modelo propuesto. El triángulo de fuerzas es equivalente en ambos modelos, ya que el ángulo de aspas es el mismo, con un valor de 60° para ambos casos. Aunque la distribución de presiones es similar, se observa una mayor concentración y un incremento en la presión máxima en las puntas de las aspas, así como una disminución de la presión en las secciones posteriores, como se ilustra en la Figura 9.22 (b). Por otro lado, en la Figura 9.23 se presenta el contorno de presiones para ambos modelos, donde se puede apreciar una distribución más homogénea de las altas presiones en la parte frontal de las aspas, mientras que las bajas presiones se encuentran en la parte posterior.

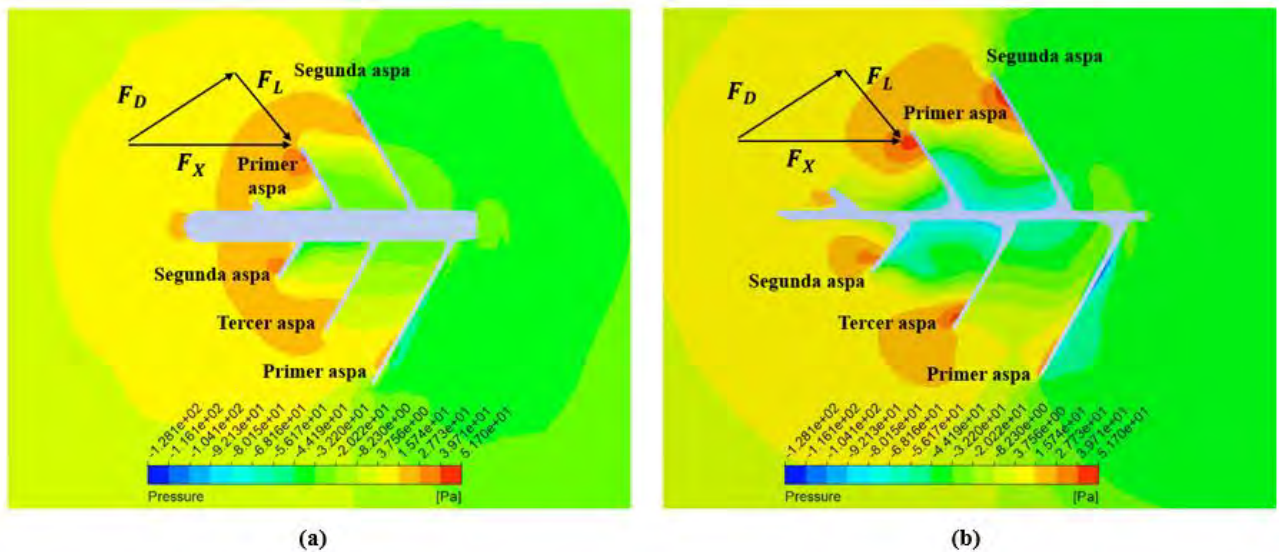


Figura 9.22. Distribución de presiones en la superficie del aerogenerador (a) Verificación (b) Propuesto.

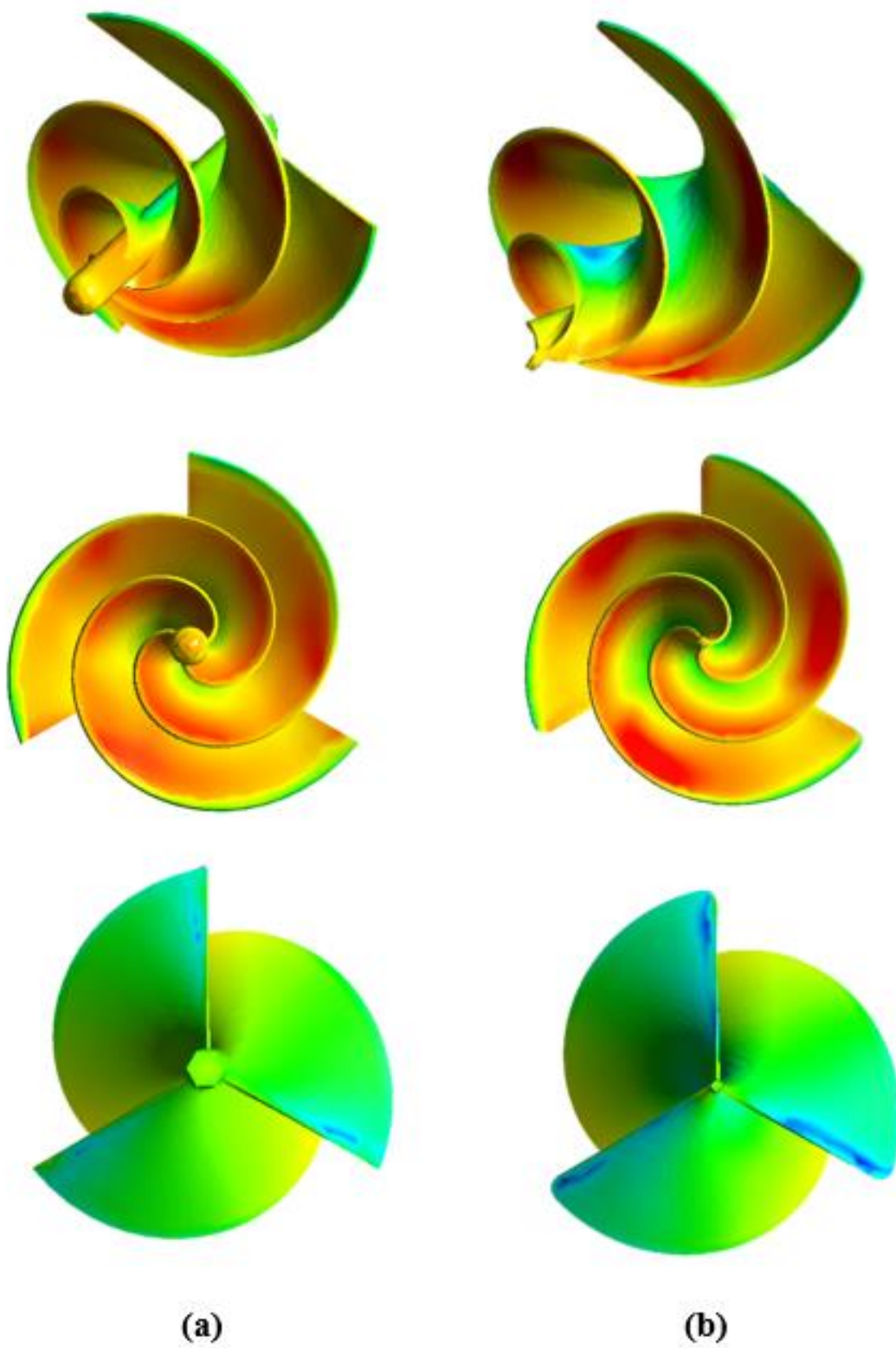


Figura 9.23. Distribución de presiones sobre el aerogenerador (a) Verificación (b) Propuesto.

En la Figura 9.24 se presenta la distribución de velocidades para ambos modelos de aerogenerador ASWT. En el diseño, se observan mayores velocidades a lo largo del rotor, destacándose zonas de alta velocidad entre la primera y segunda aspa en la parte superior del eje, y entre la segunda y tercera aspa en la parte inferior. Además, en la primera aspa se identifica una zona de alta velocidad aguas arriba, como se muestra en la Figura 9.24 (b). Estas zonas de alta velocidad, que son inversas a la distribución de presiones (Figura 9.22 (b)), se correlacionan con las zonas de baja de velocidad en las puntas de las aspas, donde se generan altas presiones. En cambio, en las regiones intermedias, entre las aspas, se observa una baja presión asociada a mayores velocidades del flujo. Estos puntos son clave en el diseño, ya que favorecen un paso más eficiente del flujo a lo largo del rotor, lo que facilita su rotación y mejora la generación de torque, como se observó en las pruebas experimentales realizadas previamente con los mismos modelos.

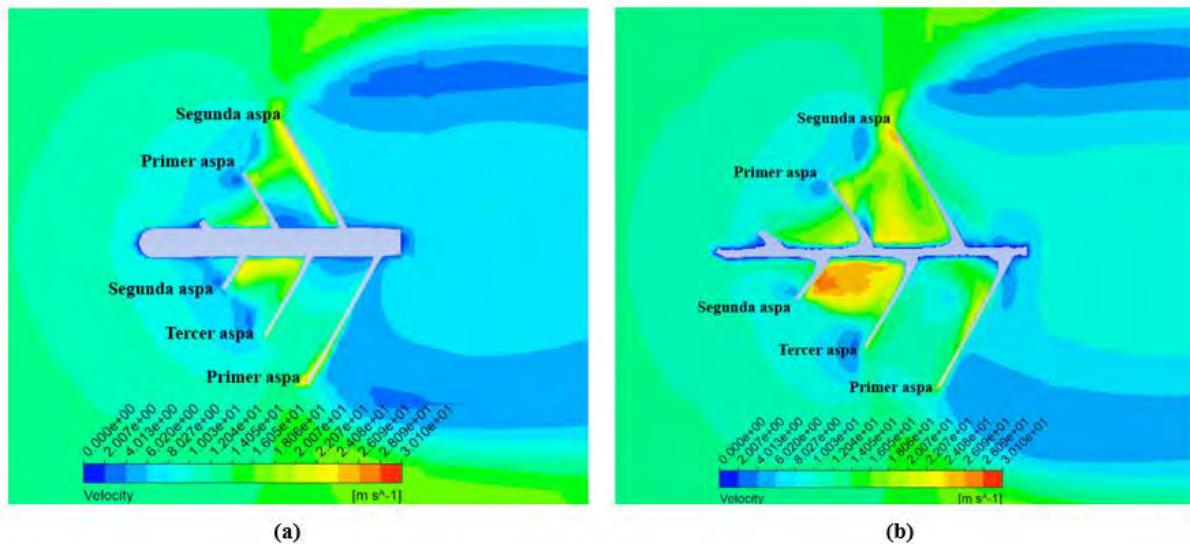


Figura 9.24. Distribución de velocidades sobre la superficie del aerogenerador (a) Verificación (b) Propuesto.

En la Tabla 9.7 se presentan las diferencias entre ambos modelos en cuanto a torque y coeficiente de torque. Además, al disponer de los valores de torque y velocidad angular del rotor, es posible determinar la potencia mecánica utilizando la Ec. 9.10.

$$P = \tau \omega \quad (9.10)$$

Donde:

P = Potencia mecánica.

τ = Torque.

ω =Velocidad angular.

Tabla 9.7 Comparación de resultados entre modelo de verificación y propuesto.

Parámetro	Valor del modelo propuesto	Valor obtenido en la verificación	Porcentaje de diferencia
Presión máxima	51.70 Pa	42.2 Pa	22.32%
Velocidad máxima	30.1 m/s	28.01 m/s	7.46%
Torque	0.06841 N·m	0.04517 N·m	51.45%
Coefficiente de Torque	0.2844	0.1878	51.45%
Potencia	8.75 W	5.78 W	51.34%

Los resultados obtenidos mostraron que el modelo propuesto presenta una mejora significativa en comparación con el diseño de referencia, de manera similar a lo observado en la prueba experimental realizada previamente. En este análisis numérico, se registraron las siguientes diferencias entre ambos modelos: un 22.32% en la presión máxima, un 7.46% en la velocidad máxima, un 51.45% en el coeficiente de torque y torque, y un 51.34% en términos de potencia.

Este trabajo representa un avance importante en la verificación del caso de estudio, ya que los resultados obtenidos muestran una correspondencia significativa con los reportados en el estudio original. Además, al realizar un análisis del modelo propuesto, se identificaron diferencias clave entre el modelo de referencia y el diseño propio. Se observó que el diseño propuesto mejora el paso del flujo a lo largo del rotor, lo que permite una mayor generación de torque, y, en consecuencia, una mayor potencia. Esta prueba numérica comparativa es esencial para validar el mejor desempeño del rotor propuesto frente al rotor de referencia, tal como se evidenció en la prueba experimental.

9.4. Evaluación estructural mediante el Método de Elementos Finitos

Una vez evaluado el comportamiento aerodinámico del aerogenerador mediante simulaciones numéricas CFD y comparados los resultados entre el modelo de referencia y el modelo propuesto en este trabajo, se obtuvieron las distribuciones de presiones ejercidas por el viento sobre las superficies del rotor para un instante de tiempo en los análisis CFD (ver Figura 9.25). Estos resultados se utilizaron para realizar un estudio del comportamiento estructural del aerogenerador. Este estudio se llevó a cabo mediante un análisis estático estructural, en el software ANSYS, en su versión estudiantil, utilizando el Método del Elemento Finito (FEM, por sus siglas en inglés) para determinar los niveles y distribuciones de esfuerzos y deformaciones en las aspas del aerogenerador.

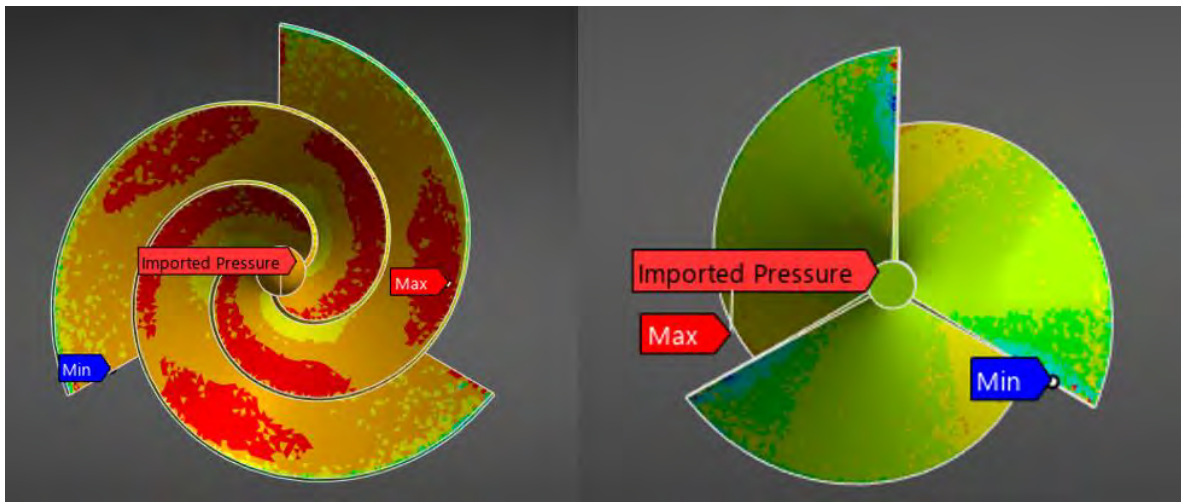


Figura 9.25. Distribuciones de presiones en las aspas del aerogenerador generadas en las simulaciones aerodinámicas CFD.

El método de Elemento Finito (FEM) es una herramienta matemática y computacional utilizada para analizar el comportamiento estructural de materiales. Su principio fundamental consiste en dividir el problema en partes más pequeñas, denominadas elementos finitos, que están conectados entre sí mediante un número finito de puntos nodales. Así, los desplazamientos en los nodos determinan el campo de desplazamientos de cada elemento finito [71].

Al aplicar el método FEM para resolver problemas estáticos, se obtiene un conjunto de ecuaciones lineales simultáneas que se pueden expresar de la siguiente forma:

$$F = kx \quad (9.11)$$

Donde:

k es la matriz de rigidez de una estructura.

x representa el vector de desplazamientos.

F representa el vector de cargas actuantes sobre la estructura.

Esta ecuación también se puede expresar en forma escalar como:

$$\begin{cases} k_{11}x_1 + k_{12}x_2 + \dots k_{1n}x_n = f_1 \\ k_{21}x_1 + k_{22}x_2 + \dots k_{2n}x_n = f_2 \\ \vdots \\ k_{n1}x_1 + k_{n2}x_2 + \dots k_{nn}x_n = f_n \end{cases}$$

Donde los coeficientes k_{ij} y las constantes f_i están dadas. El objetivo es determinar los valores de x_i , siempre que existan. En forma matricial, la ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$K (n \times n) = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix}, X (n \times 1) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, F (n \times 1) = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}$$

En el análisis de elementos finitos, el orden de la matriz k suele ser muy elevado. Por esta razón, los métodos empleados para resolver el sistema de ecuaciones lineales asociado se clasifican en dos grandes categorías: método directo o iterativo [72].

Para iniciar el análisis FEM del rotor del aerogenerador, se definieron las condiciones de frontera correspondientes. En primer lugar, se aplicaron condiciones de soporte fijo en los extremos frontal y posterior del eje del rotor, indicadas en color azul en la Figura 9.26. Estas zonas representan los puntos típicos de anclaje del rotor a su estructura de soporte, asegurando su estabilidad durante el análisis y simulando las condiciones reales de montaje.

Por otro lado, en la Figura 9.27 se destaca en color rojo la región donde se aplicó la carga, correspondiente a la distribución de presiones obtenida previamente mediante simulación CFD, como se muestra en la Figura 9.25. Esta presión se aplicó sobre toda la superficie del rotor con el fin de representar de manera realista los efectos del viento sobre el dispositivo. Al distribuir la carga en todas las partes del rotor, se logra una evaluación estructural más completa y precisa, lo que permite identificar con mayor detalle las zonas de concentración de esfuerzos y deformaciones.

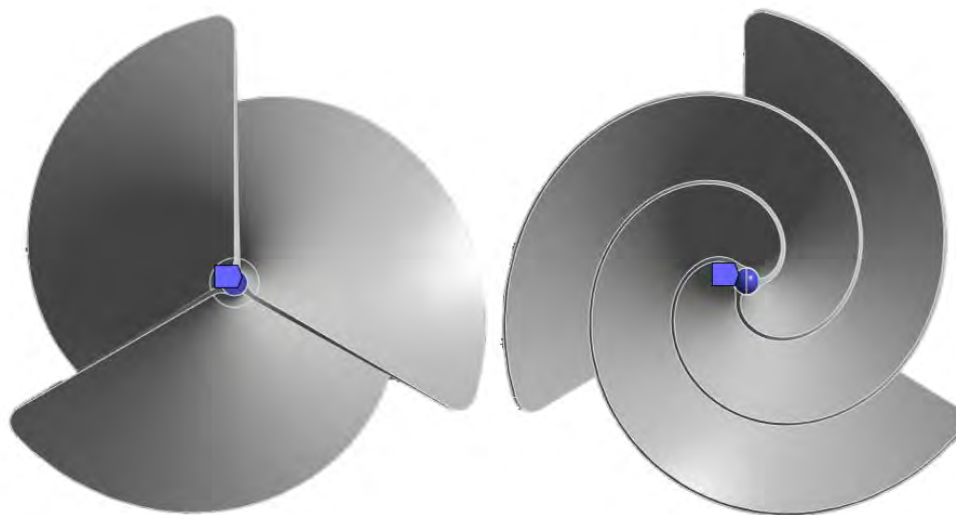


Figura 9.26. Condiciones de frontera: zonas de fijación del rotor (soportes fijos).

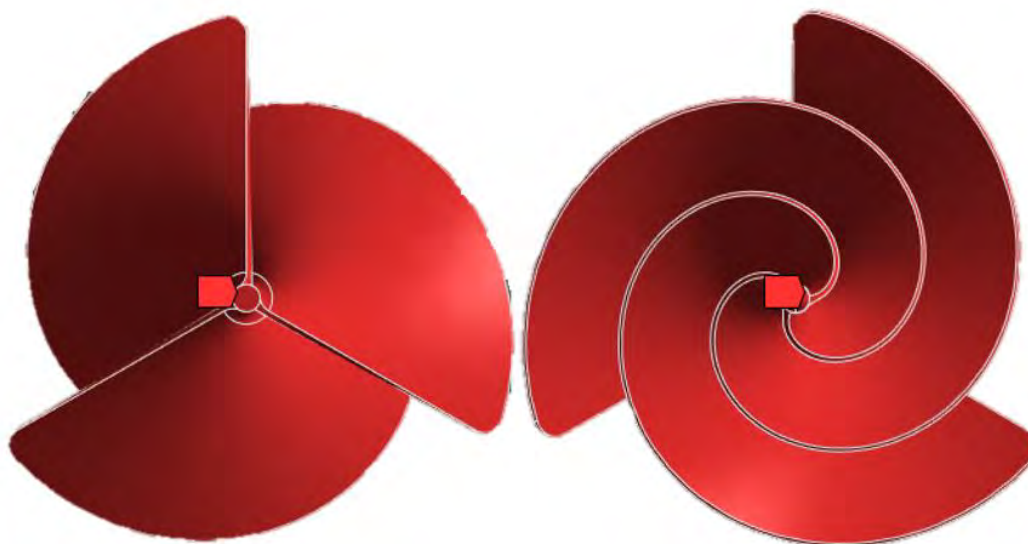


Figura 9.27. Condiciones de frontera: aplicación de la distribución de presiones sobre la superficie del rotor.

Con el objetivo de verificar la precisión de la malla empleada en el análisis estructural del rotor, se realizó un análisis de independencia de malla. Es importante destacar que, debido a las restricciones de la licencia estudiantil de ANSYS, existen limitaciones en cuanto al número máximo de nodos y elementos que se pueden utilizar. En la Tabla 9.8 se presenta el

tamaño de los elementos de la malla y la cantidad de nodos utilizados para cada uno de los casos evaluados. Para este análisis, se utilizó como variable de comparación, el valor del esfuerzo máximo en el modelo de referencia ASWT.

Tabla 9.8 Análisis de independencia de malla para la evaluación estructural del aerogenerador ASWT de referencia.

Tamaño del Elemento (mm)	Nodos	Esfuerzo máximo (MPa)	Porcentaje de diferencia (%)
10	4922	0.2271	-
8	7562	0.29948	24.16856
6	12088	0.32586	8.09550
4.5	20350	0.35703	8.73036
3.75	28760	0.35083	1.76724
3	45095	0.36165	2.99184
2.5	62854	0.35459	1.99103
2	98999	0.35921	1.28616
1.8	1.25E+05	0.35918	0.00835

El tamaño de elemento de malla más pequeño en este análisis fue de 1.8 mm, que correspondió al límite mínimo establecido para cumplir con las restricciones del número de nodos permitido. Por otro lado, el valor más grande del elemento fue de 10 mm, representando la malla más burda en este análisis. Al observar los porcentajes de diferencia entre el valor de cada malla y la malla anterior, se puede notar que la diferencia disminuye progresivamente, alcanzando una diferencia del 0.0083%. Esto indica una estabilización en los resultados obtenidos y respalda la fiabilidad de la malla seleccionada para este modelo, que cuenta con un total de 125,120 nodos. En la Figura 9.28 se presenta la gráfica de independencia de malla para el modelo ASWT de referencia, la cual muestra cómo el valor del esfuerzo máximo se estabiliza a medida que se refina la malla y la variación entre mallas sucesivas disminuye.

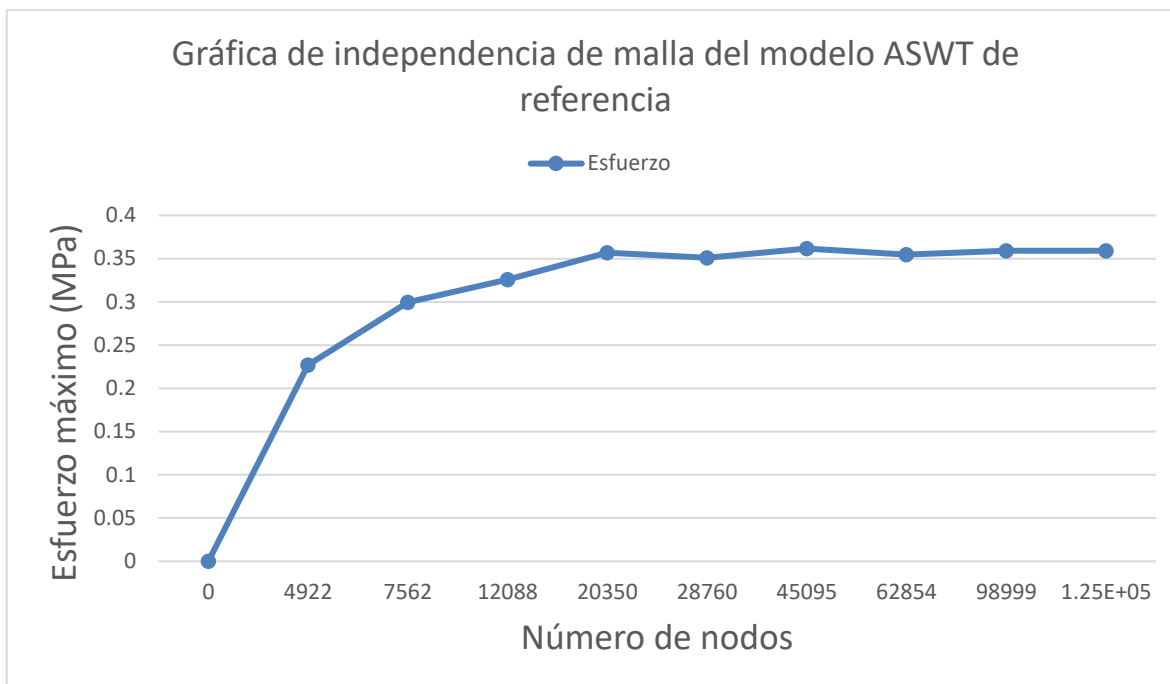


Figura 9.28. Gráfica de independencia de malla para la evaluación estructural del aerogenerador ASWT de referencia.

Para el modelo del aerogenerador ASWT propuesto, se realizó un nuevo análisis de sensibilidad de malla, debido al incremento en la longitud del modelo propuesto en comparación con el de referencia, que es resultado de la implementación de una relación de aspecto unitaria en el diseño del nuevo aerogenerador. El análisis se llevó a cabo siguiendo el mismo procedimiento y utilizando las mismas variables de comparación. Los resultados obtenidos en dicho análisis se presentan en la Tabla 9.9.

Tabla 9.9 Análisis de independencia de malla para la evaluación estructural del aerogenerador ASWT propuesto.

Tamaño del Elemento (mm)	Nodos	Esfuerzo máximo (MPa)	Porcentaje de diferencia (%)
10	15045	0.36752	-
8	11615	0.374	1.73262
6	16300	0.39136	4.43581
4.5	23303	0.39493	0.90396
3.75	31359	0.3941	0.21061
3	45939	0.39654	0.61532
2.5	62683	0.40398	1.84168
2	95105	0.40096	0.75319
1.8	1.16E+05	0.39101	2.54469
1.75	1.23E+05	0.39139	0.09709

En este caso, el tamaño mínimo del elemento de malla que permitió mantenerse dentro del límite máximo de nodos permitido fue de 1.75 mm. Al igual que en el análisis anterior, la malla burda correspondió a un tamaño de elemento de 10 mm, como se muestra en la Figura 9.29.

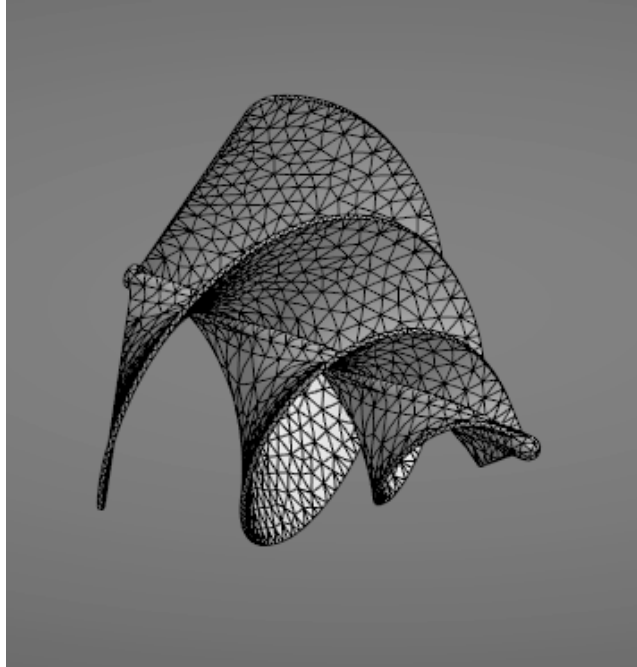


Figura 9.29. Malla sobre el rotor con un tamaño de elemento de 10 mm.

Al observar los porcentajes de diferencia entre cada malla y la anterior, se puede ver que el refinamiento permitió alcanzar una de diferencia del 0.0970%, lo que indica la estabilidad en los resultados del esfuerzo máximo para este modelo, utilizando una malla final con elementos tetraédricos con un total de 123,160 nodos la cual se puede observar en la Figura 9.30.

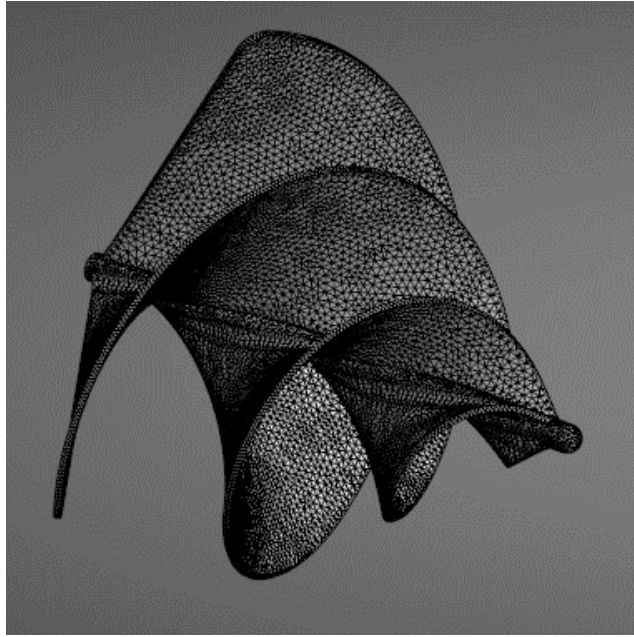


Figura 9.30. Malla sobre el rotor con un tamaño de elemento de 1.75 mm.

La Figura 9.31 muestra la gráfica de independencia de malla para el modelo ASWT propuesto. En ella se observa que los valores del esfuerzo máximo presentan tendencia estable, con diferencias mínimas entre las distintas configuraciones la malla. Este comportamiento confirma la fiabilidad y consistencia de la malla utilizada para el análisis estructural.

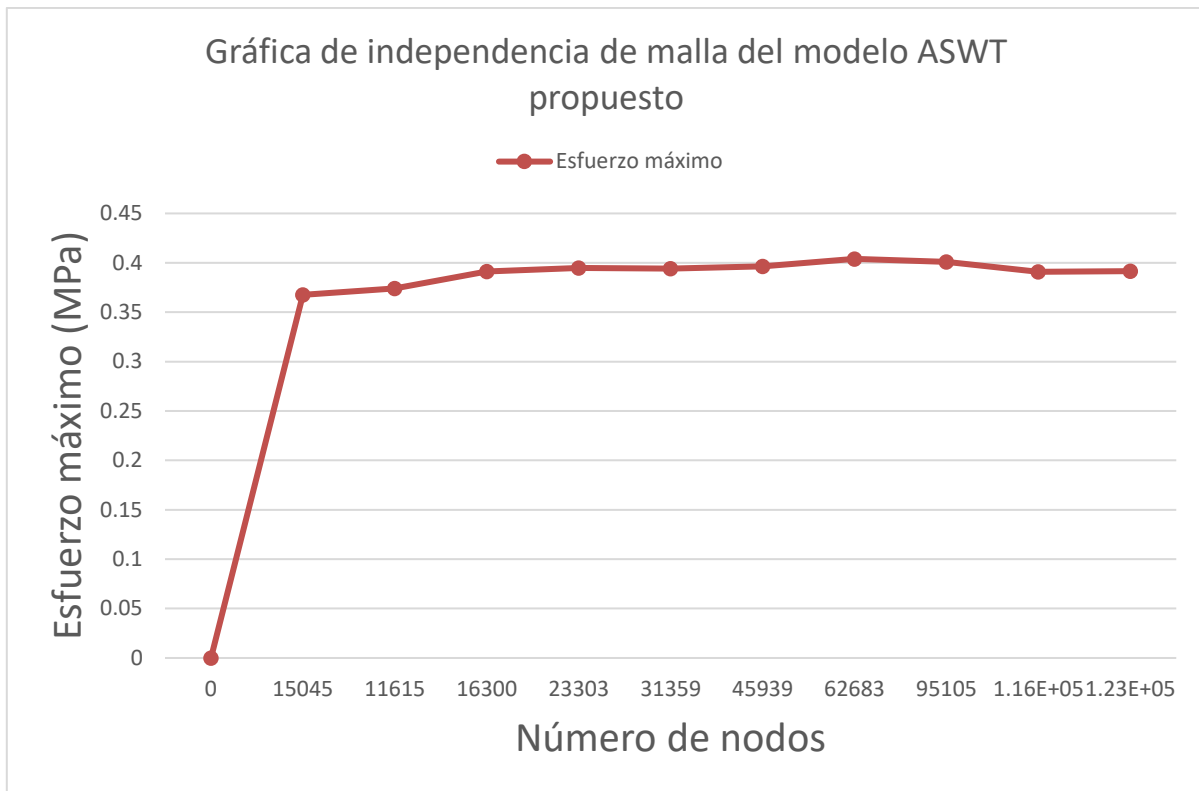
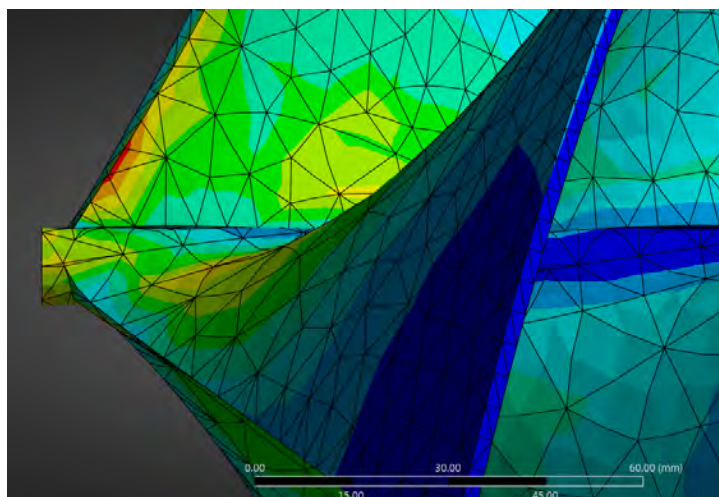
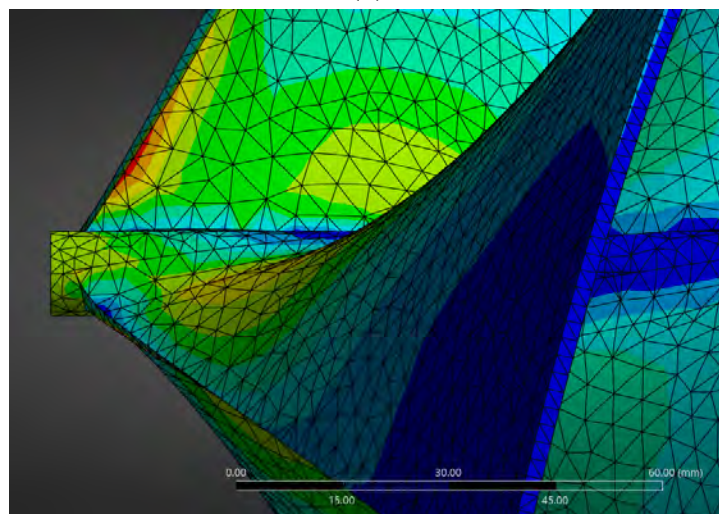


Figura 9.31. Gráfica de independencia de malla para la evaluación estructural del aerogenerador ASWT propuesto.

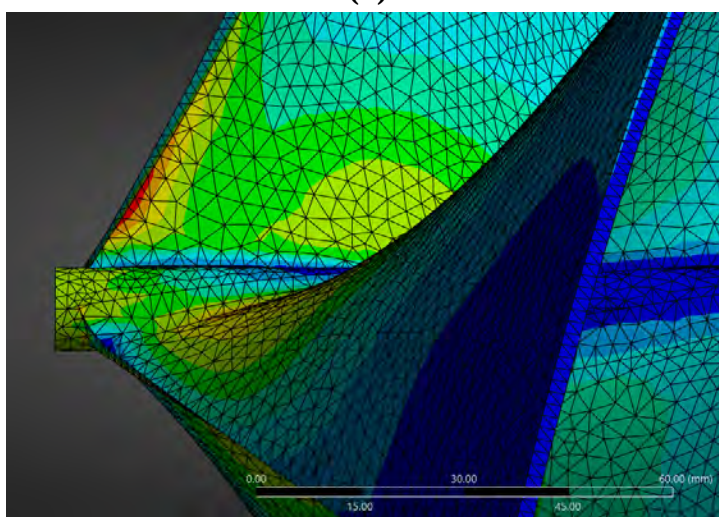
En los resultados obtenidos con las distintas configuraciones de malla: una malla burda de 15,045 nodos (Figura 9.32 (a)), una malla media de 62,683 nodos (Figura 9.32 (b)) y una malla fina de 123,160 nodos (Figura 9.32 (c)), se observa que, aunque los valores máximos de esfuerzo son relativamente similares, se recomienda utilizar la malla más fina. La principal razón es la mejora significativa en la calidad de la malla, lo cual se traduce en una distribución de esfuerzos y deformaciones más continua, precisa y coherente, como se aprecia en la comparativa de la Figura 9.32. Esta mayor resolución permite identificar mayor claridad las zonas críticas del rotor, facilitando una interpretación más detallada y confiable del comportamiento estructural. Además, al tratarse de un análisis estructural estático, el tiempo de cómputo requerido incluso para la malla más fina se mantiene dentro de un intervalo aceptable, lo que hace viable su implementación sin comprometer la eficiencia del proceso de simulación.



(a)



(b)



(c)

Figura 9.32. Resultados de esfuerzos máximo malla (a) Burda, (b) Media, (c) Fina.

Una vez confirmado la fiabilidad de la malla correspondiente para cada uno de los diseños de los aerogeneradores ASWT, se procedió a la selección de materiales para el análisis FEM: Ácido Poliláctico (PLA), Aluminio, Fibra de vidrio y Fibra de vidrio Epoxica. El PLA fue el material utilizado para la fabricación de los prototipos empleados en las pruebas experimentales previas, mientras que los otros tres materiales son alternativas que han sido reportadas en la literatura para la fabricación de este tipo de aerogeneradores [25][33][73][48]. Las Tablas 9.10 a 9.13 presentan las propiedades mecánicas de estos materiales, las cuales fueron utilizadas para realizar las distintas evaluaciones numéricas correspondientes.

Tabla 9.10 Propiedades mecánicas del Ácido Poliláctico (PLA).

Ácido Poliláctico propiedades mecánicas	
Propiedad	Especificaciones
Densidad	1250 kg/m ³
Coeficiente de Poisson	0.38
Módulo de elasticidad	3.3 GPa

Tabla 9.11 Propiedades mecánicas del Aluminio.

Aluminio propiedades mecánicas	
Densidad	2,770 kg/m ³
Coeficiente de Poisson	0.33
Módulo de elasticidad	71 GPa

Tabla 9.12 Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio.

Fibra de Vidrio propiedades mecánicas	
Densidad	2,600 kg/m ³
Coeficiente de Poisson	0.22
Módulo de elasticidad	73 GPa

Tabla 9.13 Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio epoxi.

Epoxy Glass (Fibra de Vidrio Epoxica) propiedades mecánicas	
Densidad	2,000 kg/m ³
Coeficiente de Poisson XY	0.3
Coeficiente de Poisson YZ	0.61
Coeficiente de Poisson XZ	0.3
Módulo de elasticidad Dirección X	45 GPa
Módulo de elasticidad Dirección Y	10 GPa
Módulo de elasticidad Dirección Z	10 GPa
Módulo de Corte XY	5 GPa
Módulo de Corte YZ	3.8462 GPa
Módulo de Corte XZ	5 GPa

Con el fin contar con una referencia sobre los resultados esperados en cuanto a las zonas de deformación y los puntos críticos de esfuerzo, se tomó el trabajo realizado por Salim *et al.* [48], quienes llevaron a cabo un análisis estructural de un aerogenerador tipo ASWT, evaluando su comportamiento con diferentes materiales.

En la Figura 9.33 y 9.34 se presentan los resultados obtenidos en su estudio respecto a la deformación y el esfuerzo, respectivamente. En ambas figuras, las zonas críticas están destacadas en color rojo. En cuanto a la deformación, las áreas críticas se encuentran en las puntas de las aspas, donde se experimenta una mayor deflexión. Por otro lado, los esfuerzos máximos se encuentran en las zonas cercanas a las raíces de las aspas.

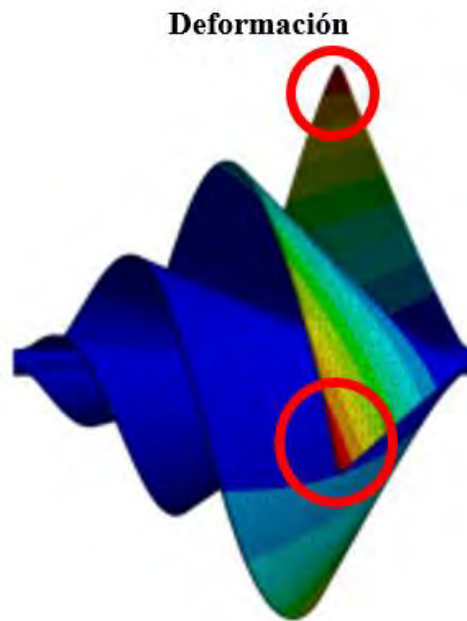


Figura 9.33. Deformación de las aspas del aerogenerador ASWT en el estudio de referencia [48] .

Esfuerzo

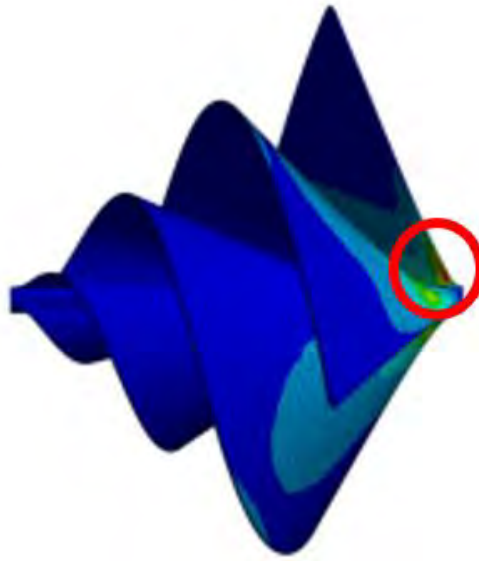


Figura 9.34. Esfuerzos en las aspas del aerogenerador ASWT en el estudio de referencia [48].

Se realizaron las evaluaciones de ambos diseños de los aerogeneradores ASWT (referencia y propuesto) con los distintos materiales mencionados previamente.

Para el primer material, el Ácido Poliláctico (PLA), se muestran en la Figura 9.35 los resultados obtenidos de deformación y esfuerzo para el aerogenerador de referencia.

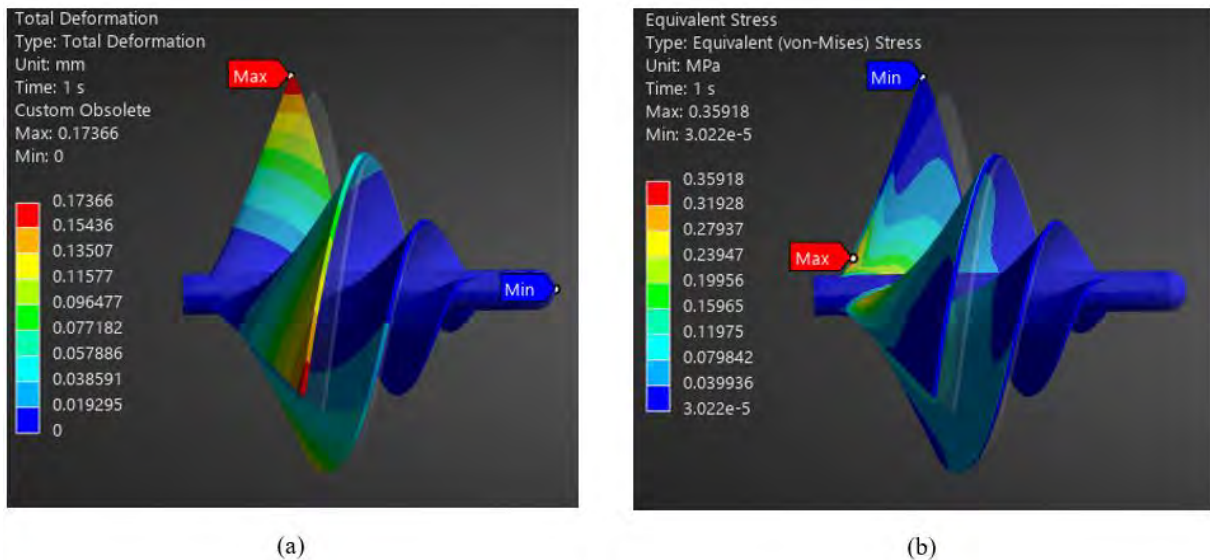


Figura 9.35. Distribuciones de deformación a) y esfuerzos b) para el diseño del aerogenerador de referencia utilizando PLA.

En la Figura 9.36, se puede observar en color rojo la zona de las puntas de las aspas, lugar que presentan la mayor deformación de todo el rotor. En esta área se genera un momento de

flexión, y se ha marcado con una flecha azul la posición original del aspa antes de la deformación. Cabe señalar que se ha aplicado un escalamiento de 1,600 veces el valor real, lo que facilita la visualización del cambio en la posición de las aspas. Al analizar los resultados, la deformación máxima es de 0.1736 mm, recordando que esta es una evaluación inicial de la estructura donde se busca determinar cualitativamente su comportamiento y correlacionarlo con lo que se ha reportado en la literatura.

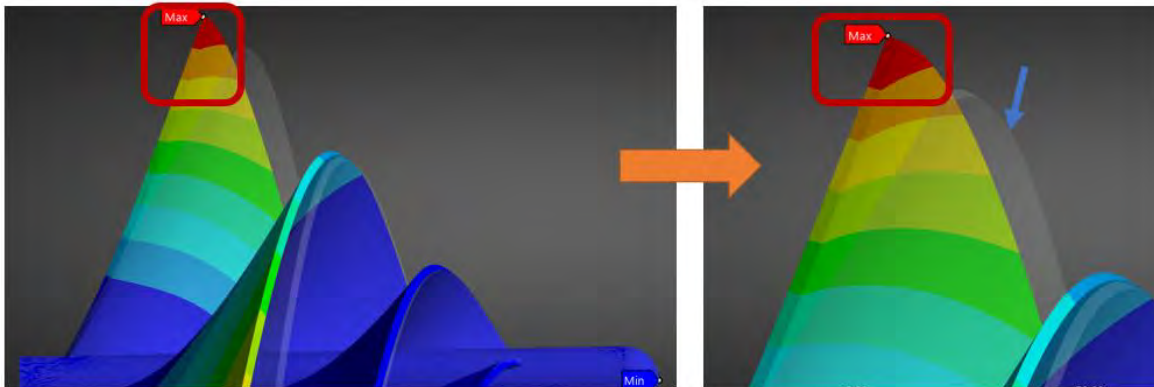


Figura 9.36. Zona de deformación máxima en las aspas del aerogenerador de referencia.

Por otro lado, en la Figura 9.37 se muestra, encerrada en color rojo, la zona de mayor esfuerzo en las aspas del aerogenerador ASWT. Se observa que las zonas críticas de esfuerzo se localizan en la raíz de las aspas, lo cual coincide con el comportamiento de la zona de mayor deformación que corresponde a la punta del aspa. Este esfuerzo en la raíz es consecuencia de la deformación en la punta del aspa. Estos resultados concuerdan con las zonas críticas previamente identificadas en el trabajo reportado en la literatura sobre el análisis estructural de este tipo de aerogeneradores.

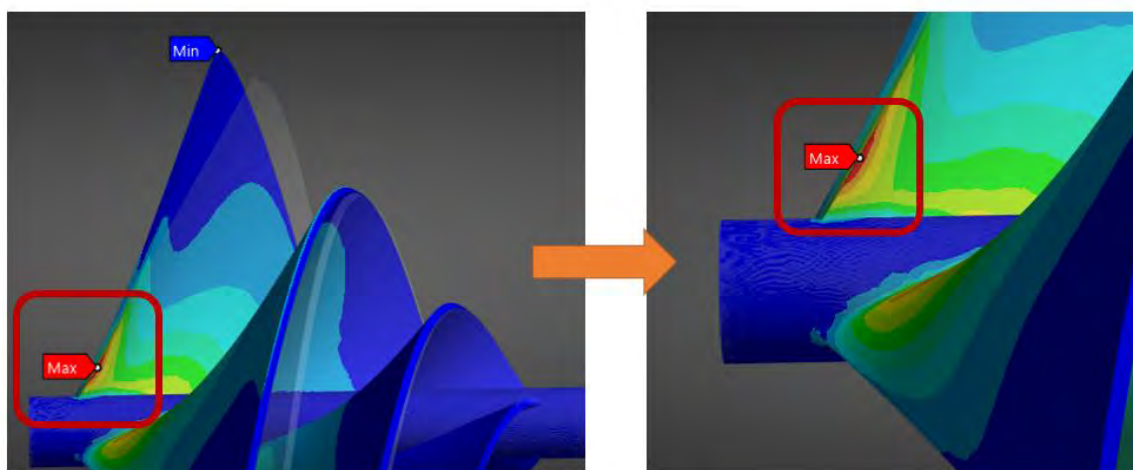


Figura 9.37. Zona de esfuerzo máximo en las aspas del aerogenerador de referencia.

En la Figura 9.38, se muestran los resultados para el aerogenerador propuesto utilizando las mismas condiciones y materiales. Se puede observar que los comportamientos, así como las zonas de máximas deformaciones y esfuerzos, presentan una correspondencia tanto con el diseño del aerogenerador de referencia como con el análisis estructural de referencia reportado en la literatura.

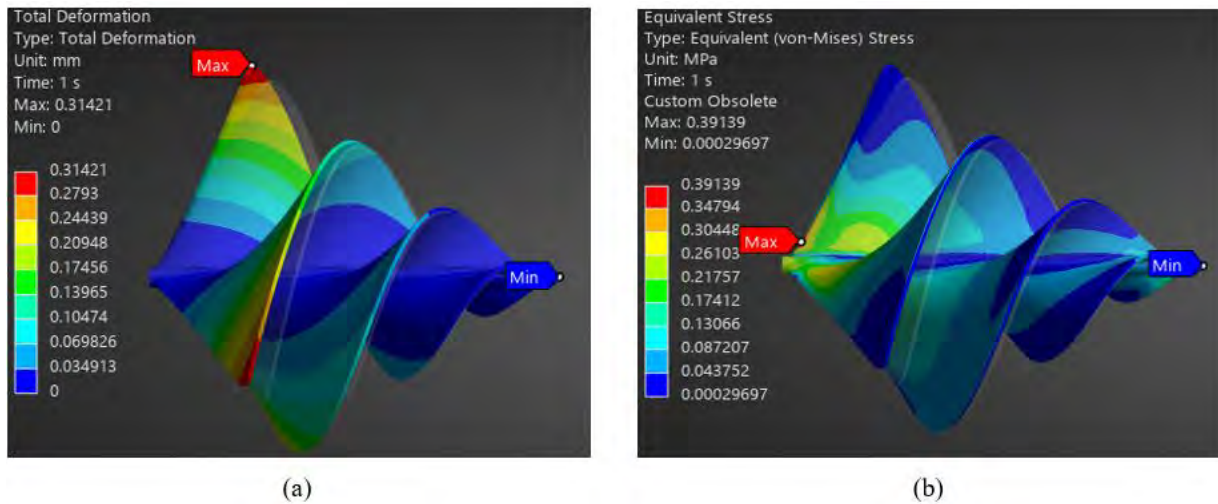


Figura 9.38. Distribuciones de deformación (a) y esfuerzos (b) del diseño propuesto utilizando PLA.

Las Figuras 9.39 a 9.44 muestran los resultados obtenidos para los distintos materiales evaluados, aplicados tanto al modelo de referencia como al modelo propuesto del aerogenerador. Estas figuras permiten una comparación visual del comportamiento estructural de cada material bajo las mismas condiciones de carga, facilitando el análisis comparativo.

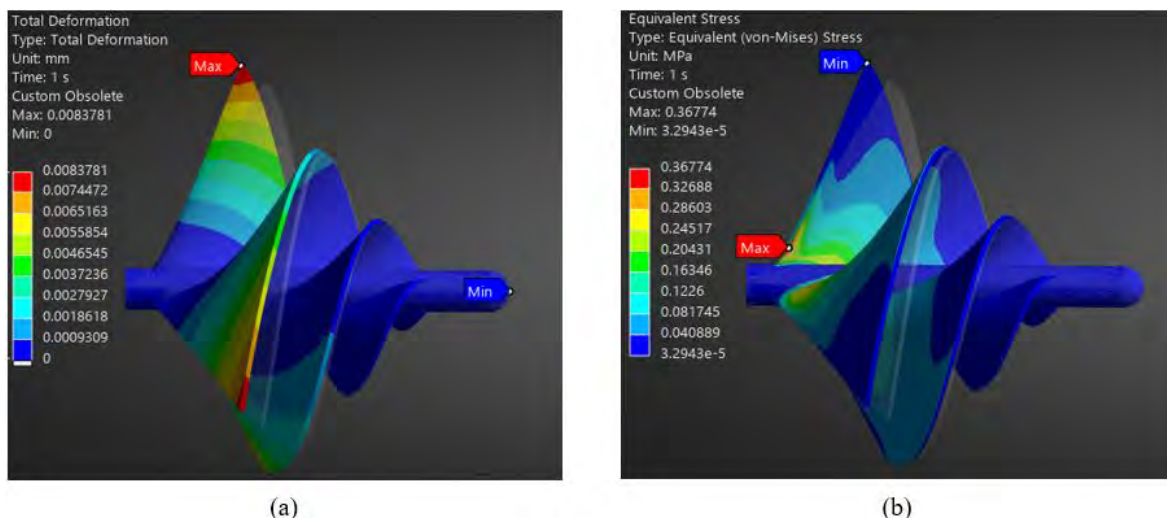
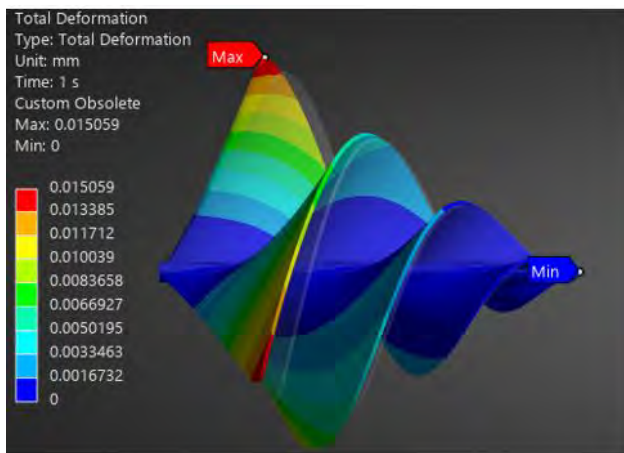
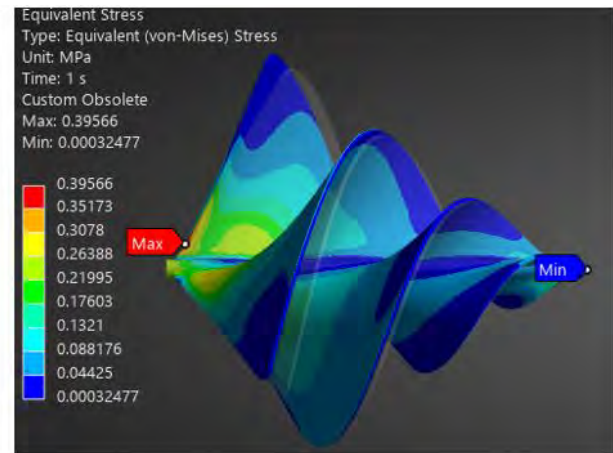


Figura 9.39. Distribuciones de deformación (a) y esfuerzos (b) en el diseño de referencia utilizando Aluminio.

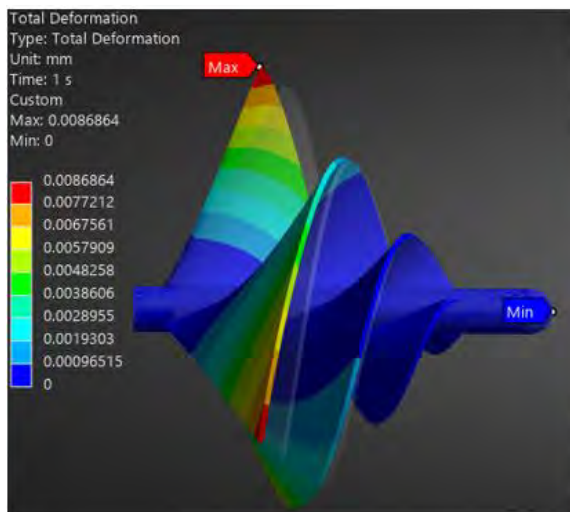


(a)

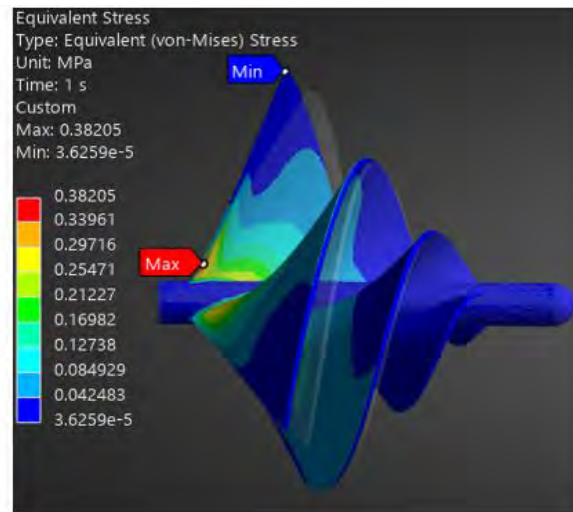


(b)

Figura 9.40. Distribuciones de deformación (a) y esfuerzos (b) en el diseño propuesto utilizando Aluminio.



(a)



(b)

Figura 9.41. Distribuciones de deformación (a) y esfuerzos (b) en el diseño de referencia utilizando Fibra de Vidrio.

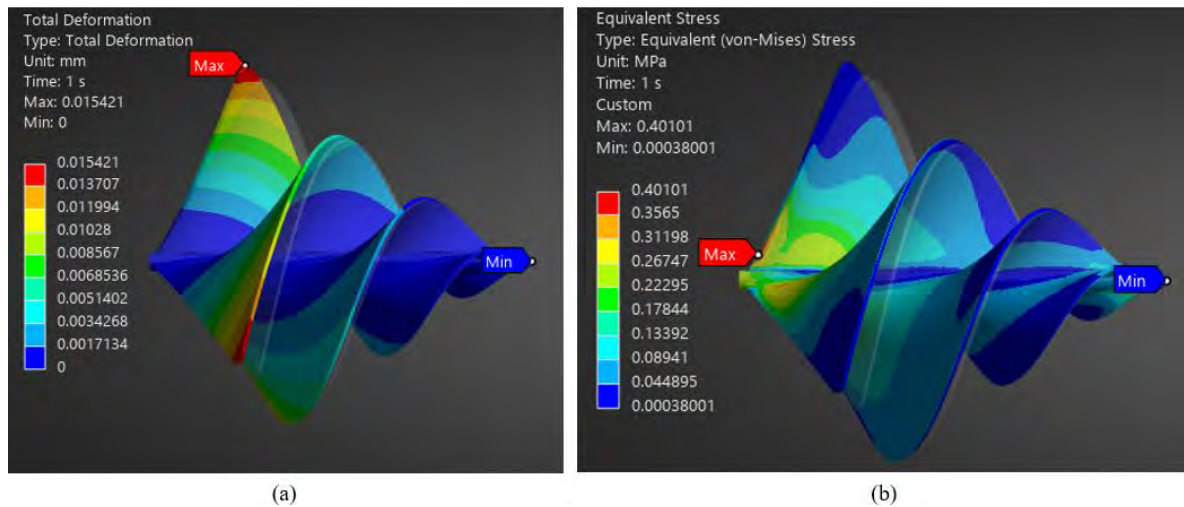


Figura 9.42. Distribuciones de deformación (a) y esfuerzos (b) en el diseño propuesto utilizando Fibra de Vidrio.

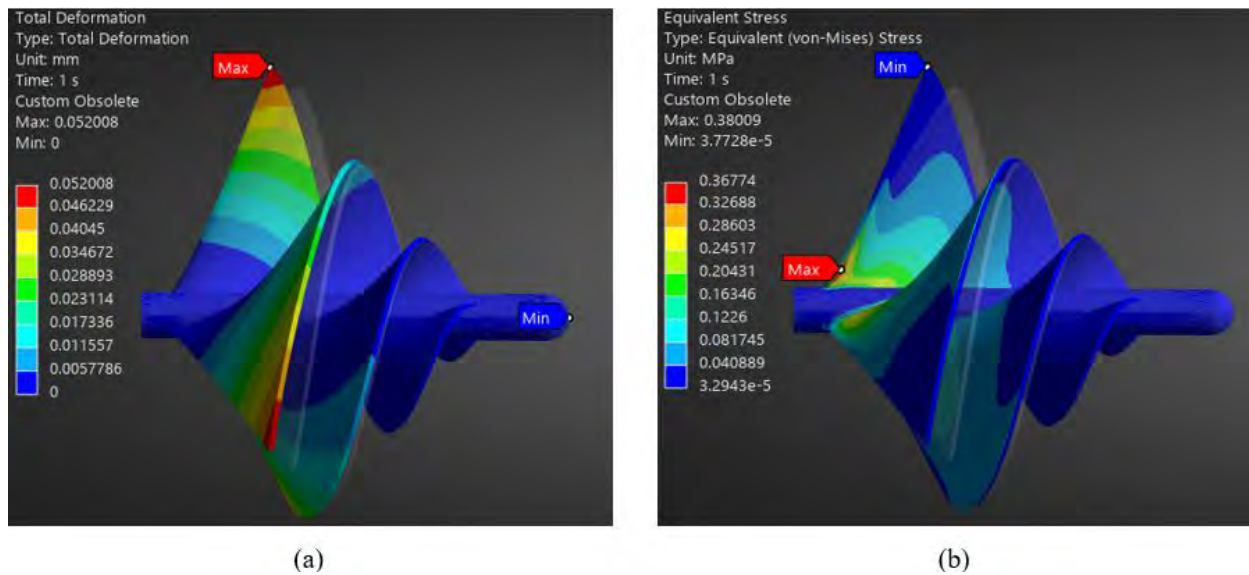


Figura 9.43. Distribuciones de deformación (a) y esfuerzos (b) en el diseño de referencia utilizando Fibra de Vidrio Epoxica.

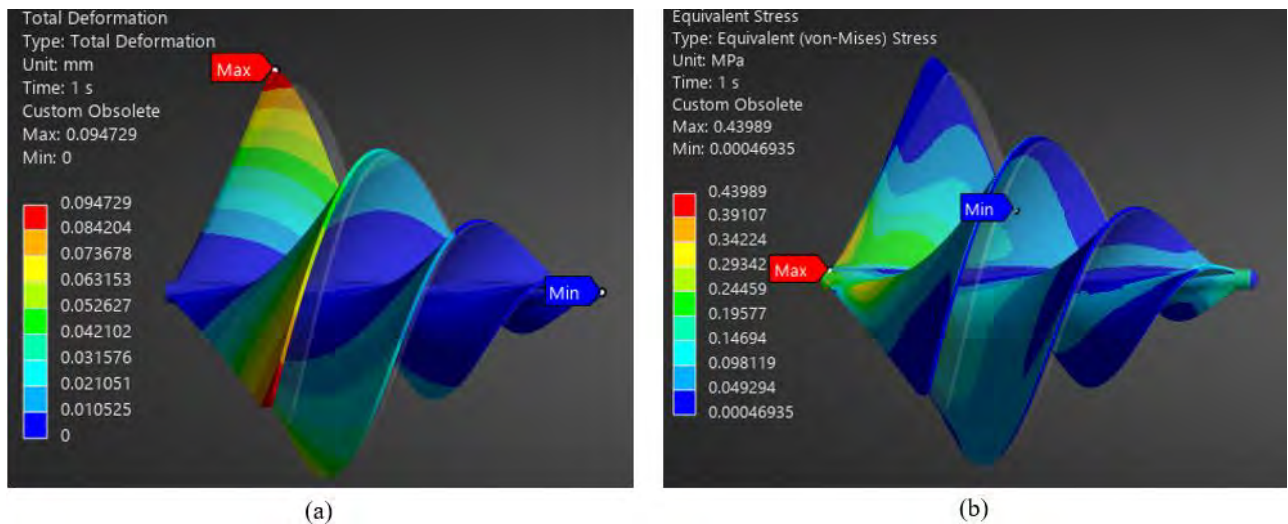


Figura 9.44. Distribuciones de deformación (a) y esfuerzos (b) en el diseño propuesto utilizando Fibra de Vidrio Epoxica.

En la Tabla 9.14 se muestran los resultados obtenidos en cuanto a deformación y esfuerzos máximos de los distintos análisis realizados, tanto para el diseño de referencia como para el modelo propuesto del aerogenerador ASWT.

Tabla 9.14 Resumen de los resultados de la evaluación estructural de los modelos ASWT de referencia y propuesto utilizando diferentes materiales.

	PLA		Aluminio		Fibra de vidrio		Fibra de vidrio epoxi	
	ASWT referencia	ASWT propuesto	ASWT referencia	ASWT propuesto	ASWT referencia	ASWT propuesto	ASWT referencia	ASWT propuesto
Deformación máxima	0.17366 mm	0.31421 mm	0.0083781 mm	0.015059 mm	0.0086864 mm	0.015421 mm	0.052008 mm	0.094729 mm
Esfuerzo máximo	0.35918 MPa	0.39139 MPa	0.36774 MPa	0.39566 MPa	0.38205 MPa	0.40101 MPa	0.38009 MPa	0.43989 MPa

De acuerdo con los resultados, se observa que el material que mostró la menor deformación frente a las presiones ejercidas sobre las aspas del rotor fue el aluminio, seguido de la fibra de vidrio. Estos materiales son comúnmente utilizados en la manufactura convencional de este tipo de aerogeneradores. Sin embargo, en este tipo de manufactura, a menudo se sacrifica la precisión en los parámetros de diseño del rotor, como los ángulos de las aspas. Por lo tanto, este análisis sugiere la posibilidad de utilizar un proceso de manufactura aditiva, como la impresión 3D, complementando con un recubrimiento adicional de fibras de vidrio con resina epóxica en el rotor. Este enfoque no solo mejoraría la resistencia del rotor, sino que también incrementaría su capacidad de absorción de cargas y su resistencia a los impactos.

En cuanto al esfuerzo máximo, el cual se presentó en las raíces de las aspas (es decir, en la parte posterior del rotor), se observó que, para todos los materiales, los valores se mantuvieron dentro de un intervalo similar, con un esfuerzo máximo promedio de 0.38 MPa.

Respecto a la comparación entre ambos modelos ASWT, el modelo propuesto mostró una mayor deformación máxima, siendo casi el doble en todos los casos de los distintos materiales analizados. Sin embargo, el esfuerzo máximo se mantuvo dentro de un valor similar al del modelo de referencia. Estas diferencias pueden atribuirse a la variación en los ejes de cada modelo. A pesar de que el eje del modelo propuesto es más pequeño y la deformación observada casi el doble en comparación con el modelo de referencia, que cuenta con un eje de mayores dimensiones, la deformación sigue siendo relativamente pequeña. Este comportamiento sugiere que el modelo propuesto, con un eje más pequeño, podría seguir siendo viable, ya que permite una reducción significativa en el peso y material del rotor sin comprometer la estabilidad estructural del aerogenerador ASWT.

10 Producción de Energía Anual

Uno de los aspectos clave en el desarrollo de tecnologías para la generación de energía eléctrica es la estimación de la Producción de Energía Anual (AEP, por sus siglas en inglés, Annual Energy Production). La AEP representa la cantidad total de energía generada por el aerogenerador a lo largo de un año y suele expresarse en mega Watts-hora por año. En este trabajo, la AEP se representa mediante un histograma que muestra la energía generada desglosada por intervalos de velocidad del viento (también conocidos como celdas o bins) [74].

La AEP puede calcularse utilizando la siguiente expresión estándar:

$$AEP = \sum_{i=1}^n P(v_i) \cdot h(v_i) \quad (10.1)$$

Donde:

$P(v_i)$ es la potencia generada por el aerogenerador a la velocidad del viento v_i .

$h(v_i)$ es el número de horas al año en que el viento trabaja a la velocidad v_i .

n es el número total de intervalos de velocidad considerados.

Existen dos tipos de AEP: la AEP bruta, que corresponde a la energía total teóricamente generada sin considerar pérdidas, y la AEP neta, que incorpora factores de corrección por pérdidas mecánicas, eléctricas y aerodinámicas, como el coeficiente de potencia del aerogenerador, además de otras ineficiencias presentes en el sistema [75].

Dado que este trabajo se centra en el diseño aerodinámico y mecánico del aerogenerador tipo ASWT, se reporta únicamente la AEP bruta, como una estimación teórica del desempeño energético del sistema.

Para el cálculo de la AEP se utilizaron resultados obtenidos en actividades previas, comenzando con el procesamiento de los datos del viento registrados en el municipio de Temixco, Morelos, durante un periodo aproximado de un año. A partir de estos datos, se realizó un análisis estadístico que permitió construir el histograma mostrado en la Figura 6.13, donde se identifica la frecuencia de ocurrencia de las distintas velocidades del viento.

Con base en este análisis, se seleccionó el intervalo de velocidades comprendido entre 2 y 9 m/s, por ser el de mayor frecuencia de ocurrencia a lo largo del año. Este intervalo representa las condiciones de viento más características del sitio, por lo que resulta fundamental para la evaluación del desempeño del rotor.

Este intervalo de velocidades fue empleado para realizar las simulaciones numéricas en Ansys Fluent, con el objetivo de determinar el torque y la velocidad angular generados por el rotor para cada caso. A partir de estos valores, se calculó la potencia mecánica producida utilizando la siguiente expresión

$$P = \tau\omega \quad (10.2)$$

Donde:

P es la potencia mecánica (W),

τ es el torque (N·m),

ω es la velocidad angular (rad/s).

La Tabla 10.1 presenta un resumen con los resultados obtenidos para cada velocidad del viento considerada, mostrando los valores de torque, velocidad angular y potencia mecánica correspondiente generada por el rotor.

Tabla 10.1 Resumen de los resultados de potencia a distintas velocidades.

Velocidad del viento [m/s]	Velocidad angular [rad/s]	Torque [Nm]	Potencia [W]
2	32	0.008346	0.267072
3	48	0.017861	0.857328
4	64	0.0312835	2.002144
5	80	0.0482303	3.858424
6	96	0.0697896	6.6998016
7	112	0.094088	10.537856
8	128	0.12319	15.76832
9	144	0.156501	22.536144

Los valores de potencia obtenidos para cada velocidad del viento permiten construir la curva de potencia del aerogenerador, la cual describe la potencia generada en función de la velocidad del viento, como se muestra en la Figura 10.1. Esta curva se obtiene al graficar los resultados de potencia derivados de las simulaciones frente a sus correspondientes velocidades del viento.

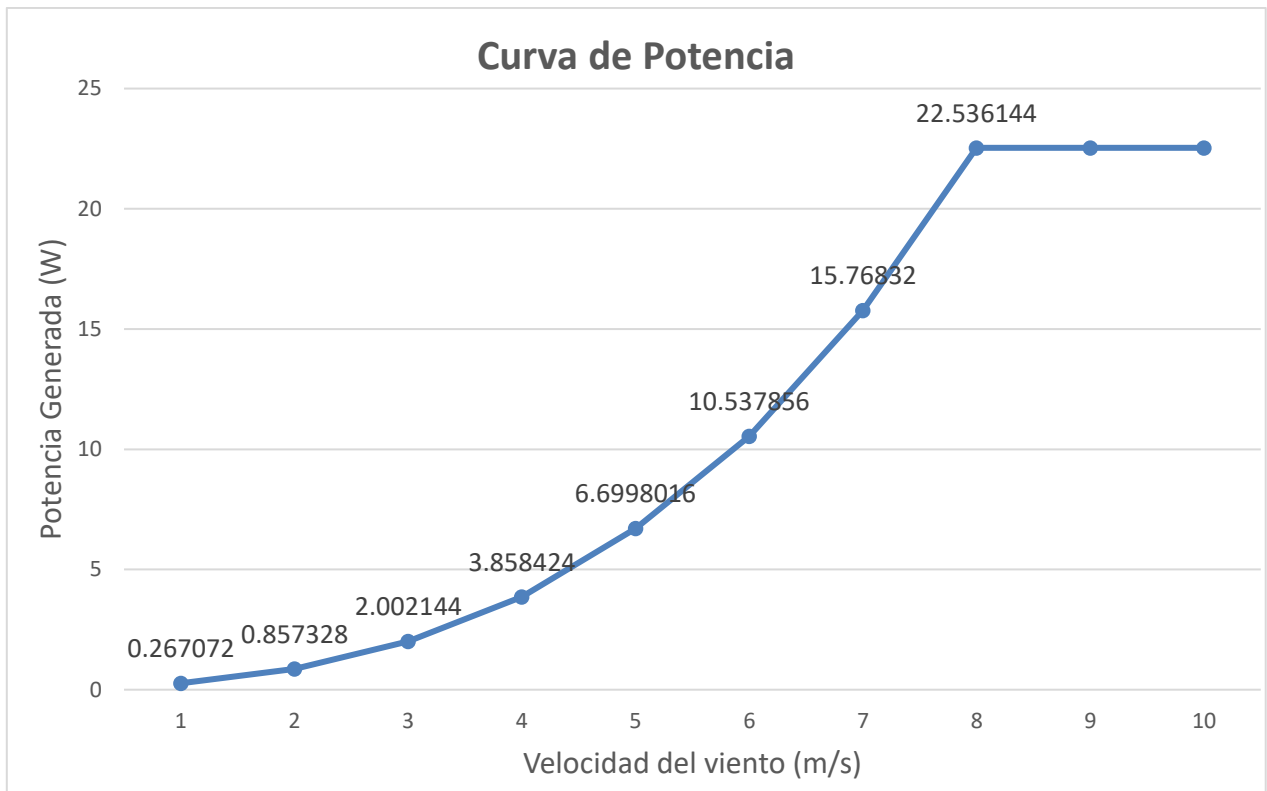


Figura 10.1. Curva de potencia del aerogenerador tipo ASWT propuesto.

La curva de potencia es una herramienta fundamental para estimar la AEP, ya que, al combinarse con la distribución estadística de las velocidades del viento como lo es el histograma obtenido, permite calcular la energía que el aerogenerador podría generar durante un año en un sitio específico.

En la Tabla 10.2 se presentan los datos correspondientes a la potencia generada por el aerogenerador para cada intervalo de velocidad de viento, así como del número de horas anuales en que dicha velocidad se registra. Los valores de energía se expresan en kilo Watts-hora (kWh) tras dividir la potencia por mil.

La suma de la energía producida en cada intervalo de velocidad (de 2 a 9 m/s) resultó en una AEP bruta total de 45.928 kWh/año, considerando un rotor con una longitud y diámetro de 25 cm. Este valor representa la energía útil que el rotor podría generar anualmente bajo las condiciones de viento analizadas, sin contemplar pérdidas eléctricas o mecánicas.

Tabla 10.2 Estimación de Producción de Energía Anual (AEP) del aerogenerador tipo ASWT propuesto.

Velocidad del viento [m/s]	Potencia [W]	Frecuencia de ocurrencia [Horas]	Producción energía [kWh/año]
2	0.267072	790	0.2110
3	0.857328	1211	1.0379
4	2.002144	1504	3.0106
5	3.858424	1579	6.0937
6	6.6998016	1350	9.0425
7	10.537856	970	10.2217
8	15.76832	585	9.2271
9	22.536144	314	7.0839
Total			45.928

Estos datos se presentan gráficamente en la Figura 10.2, que muestra la producción de energía anual en función de las distintas velocidades del viento analizadas.

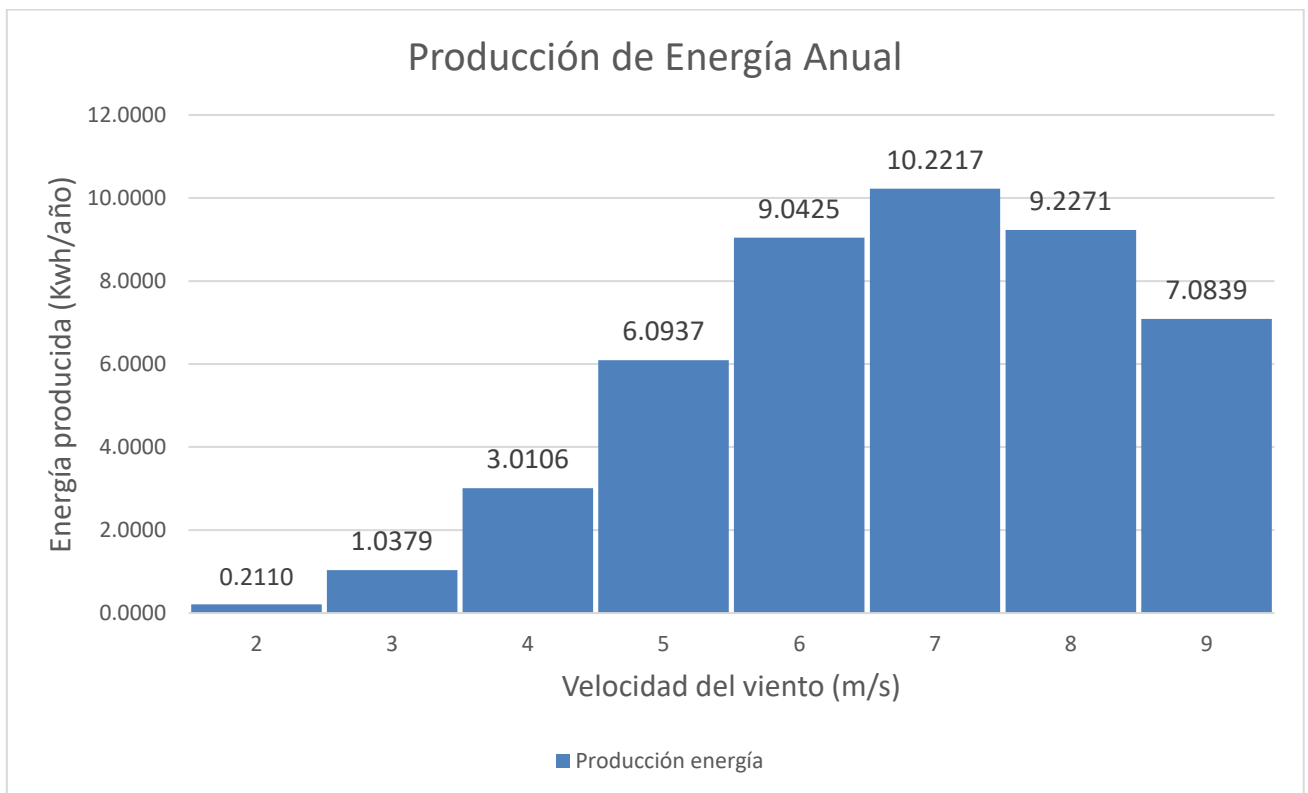


Figura 10.2. Gráfica de Producción de Energía Anual del aerogenerador tipo ASWT propuesto.

Con el objetivo de contextualizar la producción energética del aerogenerador propuesto, se comparó su Producción de Energía Anual (AEP) con el consumo típico de focos LED domésticos de 8W.

El consumo energético de un foco LED se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Consumo (kWh)} = \frac{\text{Potencia} \times \text{Horas de uso}}{1000} \quad (10.3)$$

Aplicando esta expresión a un foco LED de 8 W que se utiliza en promedio de 5 horas al día:

$$\frac{8 \text{ W} \times \frac{5h}{\text{día}} \times 365 \text{ días}}{1000} = 14.6 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \quad (10.4)$$

Por lo tanto, tres focos LED con estas características consumirían:

$$3 \times 14.6 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} = 43.8 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \quad (10.5)$$

Este consumo puede compararse con la AEP bruta estimada del aerogenerador, la cual fue de 45.928 kWh/año. Lo anterior indica que, en las condiciones de viento analizadas, el aerogenerador sería capaz de cubrir el consumo energético anual de tres focos LED de 8 W, utilizados durante 5 horas diarias.

Además de la comparación del consumo de tres focos LED de 8 W, también es posible contextualizar el potencial energético del aerogenerador con el consumo de otros aparatos de uso doméstico. De acuerdo con datos publicados por la Comisión Federal de Electricidad [76] y presentados en la Figura 10.3, el consumo promedio anual de un foco Led de 10 W, utilizado durante 4 horas diarias, es de aproximadamente 14.4 kWh.

Con una producción de 45.928 kWh/año, el aerogenerador es capaz de abastecer al menos tres dispositivos de este tipo, o bien una combinación de otros aparatos de bajo consumo energético, como una licuadora, cuyo consumo es de aproximadamente 10.5 kWh, o un tostador de pan, con un consumo promedio de 18.24 kWh al año.

APARATO	CAPACIDAD (WATTS)	SI LO UTILIZARAS...	EL CONSUMO BIMESTRAL (kWh) SERÍA...	EL CONSUMO ANUAL (kWh) SERÍA...
FOCO LED	10	4 hrs.	2.4	14.4
ASPIRADORA	1500	45 min/ 3 días a la semana	27.0	162
APARATO DE TV DE PAGA	20	2 hr./ semana	0.3	1.92
T. V.	65	10 hrs	39.0	234
SECADORA DE CABELLO	1800	30 min / 2 veces a la semana	14.4	86.4
REFRIGERADOR	400	8 hrs.	192.0	1152
LICUADORA	350	5min. / día	1.8	10.5
CAFETERA	850	20 min. / día	17.0	102
RELOJ DE PARED	2	24 hrs.	0.1	0.72
RASURADORA	15	10min / día	0.2	0.9
LAMPARA FLUORESCENTE DE 39W	44.85	4 hrs.	10.8	64.584
LAMPARA FLUORESCENTE DE 75W	86.25	4 hrs.	20.7	124.2
SECADORA DE ROPA	1270	4 hrs /semana	81.3	487.68
AIRE ACONDICIONADO 1 TON.	1800	7 hr / día	756.0	4536
AIRE ACONDICIONADO DE VENTANA 1.5 TON.	2700	7 hr / día	1134.0	6804
AIRE ACONDICIONADO DE VENTANA 2 TON.	3600	7 hr / día	1512.0	9072
HORNO DE MICROONDAS	1200	30 min /día	36.0	216
HORNO ELÉCTRICO	1000	90 min/semana	12.0	72
LAVADORA DE PLATOS	1180	3hrs/día	212.4	1274.4
LAVADORA DE ROPA	395	8 hrs /semana	25.3	151.68
PARRILLA ELÉCTRICA	1000	2 hrs / semana	16.0	96
PLANCHA	1000	3 hrs / semana	24.0	144
TOSTADOR DE PAN	760	30 min / semana	3.0	18.24
MINISPLIT 1 TON	1100	7 hr / día	462.0	2772
MINISPLIT 2 TON	2200	7 hr / día	924.0	5544
COMPUTADORA	60	4 hrs /día	14.4	86.4
STAND BY (EQUIPOS)	20	24 hrs /día	28.8	172.8

Figura 10.3. Consumo de equipos eléctricos de acuerdo con la Comisión Federal de Electricidad [76].

Si bien el modelo de aerogenerador propuesto no está diseñado para cubrir demandas elevadas, como la de un refrigerador, sí puede complementar el consumo energético de equipos de uso intermitente o baja demanda, tales como lámparas, electrodomésticos o dispositivos electrónicos.

Esta comparación permite destacar el potencial del diseño como una alternativa factible para aplicaciones de microgeneración de energía en entornos urbanos. Su implementación podría contribuir a reducir la carga energética de la red eléctrica convencional o incluso abastecer puntos específicos dentro de una vivienda.

Es importante señalar que este análisis se basa en el desempeño de un único aerogenerador con dimensiones reducidas, de 25 cm de longitud y diámetro, lo cual resalta aún más su eficiencia relativa dentro de su escala de aplicación.

11 Conclusiones

La presente tesis se centró en el diseño, evaluación y validación de un aerogenerador de eje horizontal con una configuración innovadora inspirada en la espiral de Arquímedes. El objetivo principal fue contribuir al desarrollo de tecnologías para la generación de energía eólica de baja potencia adaptadas a entornos urbanos, mediante un enfoque integral que abarcó desde la caracterización del recurso eólico hasta la validación numérica y experimental del modelo propuesto. Como resultado de este proceso, se logró demostrar el desempeño, viabilidad y la funcionalidad del aerogenerador bajo condiciones de baja velocidad de viento.

En una primera etapa, se realizó un análisis estadístico de los datos del viento recolectados en el sitio seleccionado, lo que permitió comprender el comportamiento característico del recurso eólico en un entorno urbano. Este análisis reveló un intervalo de velocidades predominantes entre 2 y 9 m/s, información clave para establecer los parámetros de diseño y condiciones de operación del aerogenerador.

A partir del análisis de diversos parámetros de diseño, se desarrollaron los modelos geométricos tanto del aerogenerador propuesto como de un modelo de referencia, utilizando herramientas de Diseño Asistido por Computadora (CAD). Ambos modelos fueron evaluados y comparados mediante simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), cuyos resultados evidenciaron mejoras significativas en el diseño propuesto. En particular, se observó un incremento del 51.45% en el coeficiente de torque y en el torque mismo, así como una mejora del 51.34% en términos de generación de potencia, en comparación con el modelo de referencia.

Posteriormente, ambos modelos fueron fabricados mediante técnicas de manufactura aditiva (impresión 3D), lo que permitió llevar a cabo pruebas experimentales comparativas. En dichas pruebas, el modelo propuesto demostró una mayor capacidad para iniciar su operación a bajas velocidades de viento, requiriendo un 31.5% menos de velocidad del viento para romper la inercia en comparación con el modelo de referencia. Además, alcanzó velocidades máximas y mínimas de giro superiores en un 21.8% y 45.4%, respectivamente. Tal como se observó en las pruebas realizadas en el túnel de viento, aunque ambos modelos lograron velocidades de giro similares a ciertos regímenes, el modelo propuesto presentó una mayor estabilidad estructural frente a velocidades moderadas, lo que refuerza su idoneidad para aplicaciones en entornos urbanos con recursos eólicos limitados y condiciones de operación variables.

Adicionalmente, se realizó un análisis estructural del aerogenerador mediante el Método de Elementos Finitos (FEM), con el objetivo de verificar la integridad mecánica bajo condiciones operativas. Los resultados indicaron que el diseño propuesto presenta niveles de

esfuerzos y deformaciones dentro de límites aceptables para materiales comúnmente utilizados en la fabricación de aerogeneradores de pequeña escala.

Finalmente, se estimó la Producción de Energía Anual (AEP) bruta a partir de la curva de potencia obtenida y la distribución de frecuencias de las velocidades del viento. Este modelo propuesto mostró una generación anual estimada de 45.93 kWh, lo que equivale aproximadamente al consumo energético de tres focos LED de 8 W encendidos durante 5 horas diarias a lo largo de un año. Esta estimación permite dimensionar el alcance del dispositivo y resalta su potencial como alternativa viable para aplicaciones de micro generación eléctrica en viviendas o entornos urbanos.

En conjunto, todas las actividades desarrolladas en este trabajo condujeron a una nueva propuesta de diseño aerodinámico para un aerogenerador tipo ASWT. Los resultados obtenidos respaldan la factibilidad de implementar este tipo de dispositivos en zonas urbanas, bajo esquemas de generación distribuida, es decir, generando y consumiendo energía en el mismo lugar.

En síntesis, los aerogeneradores en espiral de Arquímedes representan una alternativa innovadora y sostenible frente a los desafíos derivados de la crisis climática y el aumento en la demanda energética. Al aprovechar el recurso eólico de forma más limpia, eficiente y descentralizada, ofrecen una solución viable para generar electricidad justo en los entornos donde más se requiere. Esta visión promueve un enfoque responsable y ecológico hacia el futuro energético de las ciudades.

11.1. Trabajos futuros y recomendaciones

Si bien esta tesis logró cumplir con los objetivos planteados para el desarrollo del diseño aerodinámico de un Aerogenerador en Espiral de Arquímedes (ASWT), es importante destacar que este tipo de dispositivos continúa siendo objeto de estudio, debido a su comportamiento aerodinámico complejo y a la relativa novedad de su configuración. En este sentido, se proponen las siguientes líneas de investigación para trabajos futuros:

- **Análisis estructural del rotor:**

Una vez definido el diseño geométrico, es fundamental realizar un análisis estructural detallado del rotor con el fin de evaluar su integridad mecánica bajo condiciones reales de operación. En este análisis se recomienda incluir:

- La evaluación de tensiones y deformaciones en las aspas y el eje, utilizando simulaciones con el Método de Elemento Finito (FEM).

- Estudio de modos de vibración y posibles frecuencias de resonancia, con el objetivo de prevenir fallas por fatiga o fenómenos de resonancia durante el funcionamiento continuo del rotor.
- Análisis de cargas cíclicas provocadas por variaciones en la velocidad del viento y su influencia en la vida útil del sistema.

- **Diseño y análisis de la base de soporte:**

Es importante revisar y diseñar una estructura de soporte adecuada, que garantice estabilidad, seguridad y adaptabilidad a condiciones reales. Se recomienda considerar:

- La adaptabilidad de la base a distintas condiciones topográficas y ambientales, como superficies irregulares o estructuras móviles.
- La resistencia a cargas estáticas y dinámicas provocadas por el peso del rotor y del generador, así como por las fuerzas aerodinámicas y eventos extremos como ráfagas de viento.
- El uso de materiales resistentes a la intemperie, que además sean de fácil instalación y mantenimiento.

- **Análisis del efecto de la estela en configuraciones múltiples:**

En aplicaciones prácticas es común la instalación de aerogeneradores en conjunto, formando pequeños campos eólicos urbanos o módulos en serie. Por ello, se recomienda realizar un análisis detallado del efecto de la estela generada por un rotor ASWT sobre otro instalado aguas abajo. Por lo que se recomienda:

- La evaluación de la interacción aerodinámica entre rotores, mediante simulaciones CFD que consideren la generación y disipación de vórtices en el flujo.
- El análisis de la pérdida de rendimiento del segundo rotor debido a la turbulencia provocada por el primero.
- La exploración de configuraciones óptimas de separación, alineación y altura entre rotores, con el objetivo de maximizar la eficiencia conjunta del sistema.

- **Complemento experimental para la evaluación integral del aerogenerador:**

Con el fin de obtener una comparación más detallada y precisa del desempeño de los aerogeneradores ASWT, se recomienda complementar las pruebas experimentales mediante la caracterización física, geométrica y mecánica de los componentes del rotor y la base. Esto permitiría asegurar que las evaluaciones se realicen bajo condiciones equivalentes y reproducibles. Por lo tanto, se sugiere:

- Medir la masa total, la distribución de peso y la rigidez estructural de cada rotor, así como evaluar el acabado superficial y las tolerancias dimensionales.
- Instrumentar el sistema para la medición de torque y potencia a distintas velocidades de viento, con el fin de obtener curvas de desempeño completas.
- Estandarizar las condiciones de montaje, sujeción y alineación en el túnel de viento, minimizando la influencia de factores externos sobre los resultados.
- Modificar el ángulo de incidencia del viento para analizar el comportamiento del aerogenerador bajo diferentes orientaciones y condiciones de flujo.

12 Referencias

- [1] K. Song, H. Huan, y Y. Kang, “Aerodynamic Performance and Wake Characteristics Analysis of Archimedes Spiral Wind Turbine Rotors with Different Blade Angle”, *Energies (Basel)*, vol. 16, núm. 1, p. 385, dic. 2022, doi: 10.3390/en16010385.
- [2] A. K. Wright y D. H. Wood, “The starting and low wind speed behaviour of a small horizontal axis wind turbine”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 92, núm. 14–15, pp. 1265–1279, dic. 2004, doi: 10.1016/j.jweia.2004.08.003.
- [3] A.-S. Yang, Y.-M. Su, C.-Y. Wen, Y.-H. Juan, W.-S. Wang, y C.-H. Cheng, “Estimation of wind power generation in dense urban area”, *Appl Energy*, vol. 171, pp. 213–230, jun. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.03.007.
- [4] Z. Tasneem, A. Al Noman, S. Das, D. Saha, M. Islam, M. Ali, M. R Badal, M. Ahamed, S. Moyeen y F. Alam, “An analytical review on the evaluation of wind resource and wind turbine for urban application: Prospect and challenges”, *Developments in the Built Environment*, vol. 4, p. 100033, nov. 2020, doi: 10.1016/j.dibe.2020.100033.
- [5] B. Blocken, J. Carmeliet, y T. Stathopoulos, “CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings—effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 95, núm. 9–11, pp. 941–962, oct. 2007, doi: 10.1016/j.jweia.2007.01.013.
- [6] W. Zhao, H. Ren, K. Kawamura, H. Du, X. Chen, S. Yue, Q. Xie, L. Wei, P. Li, X. Zeng, S. Kong, “Vertical distribution of particle-phase dicarboxylic acids, oxoacids and α -dicarbonyls in the urban boundary layer based on the 325 m tower in Beijing”, *Atmos Chem Phys*, vol. 20, núm. 17, pp. 10331–10350, sep. 2020, doi: 10.5194/acp-20-10331-2020.
- [7] D. Micallef y G. van Bussel, “A Review of Urban Wind Energy Research: Aerodynamics and Other Challenges”, *Energies (Basel)*, vol. 11, núm. 9, p. 2204, ago. 2018, doi: 10.3390/en11092204.
- [8] J. F. Barlow, “Progress in observing and modelling the urban boundary layer”, *Urban Clim*, vol. 10, pp. 216–240, dic. 2014, doi: 10.1016/j.uclim.2014.03.011.
- [9] T. F. Ishugah, Y. Li, R. Z. Wang, y J. K. Kiplagat, “Advances in wind energy resource exploitation in urban environment: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 37, pp. 613–626, sep. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.05.053.

- [10] A. B. Tabrizi, J. Whale, T. Lyons, y T. Urmee, “Rooftop wind monitoring campaigns for small wind turbine applications: Effect of sampling rate and averaging period”, *Renew Energy*, vol. 77, pp. 320–330, may 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.12.037.
- [11] A. Makkawi, A. Celik, y T. Muneer, “Evaluation of micro-wind turbine aerodynamics, wind speed sampling interval and its spatial variation”, *Building Services Engineering Research and Technology*, vol. 30, núm. 1, pp. 7–14, feb. 2009, doi: 10.1177/0143624408096343.
- [12] D. F. Muñoz, “Viento en la capa límite. Turbulencia”, Blog meteo clim.
- [13] British Standards Institution., *Wind turbines. Part 2, Design requirements for small wind turbines*. BSI, 2006.
- [14] A. Dilimulati, T. Stathopoulos, y M. Paraschivoiu, “Wind turbine designs for urban applications: A case study of shrouded diffuser casing for turbines”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 175, pp. 179–192, abr. 2018, doi: 10.1016/j.jweia.2018.01.003.
- [15] T. Stathopoulos, H. Alrawashdeh, A. Al-Quraan, B. Blocken, A. Dilimulati, M. Paraschivoiu y P. Pilay, “Urban wind energy: Some views on potential and challenges”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 179, pp. 146–157, ago. 2018, doi: 10.1016/j.jweia.2018.05.018.
- [16] E. Mollasalehi, Q. Sun, y D. Wood, “Contribution of Small Wind Turbine Structural Vibration to Noise Emission”, *Energies (Basel)*, vol. 6, núm. 8, pp. 3669–3691, jul. 2013, doi: 10.3390/en6083669.
- [17] A. D. Peacock, D. Jenkins, M. Ahadzi, A. Berry, y S. Turan, “Micro wind turbines in the UK domestic sector”, *Energy Build*, vol. 40, núm. 7, pp. 1324–1333, ene. 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.12.004.
- [18] Q. Lu, Q. Li, Y.-K. Kim, y K.-C. Kim, “A study on design and aerodynamic characteristics of a spiral-type wind turbine blade”, *Journal of the Korean Society of Visualization*, vol. 10, núm. 1, pp. 27–33, abr. 2012, doi: 10.5407/JKSV.2011.10.1.027.
- [19] K. C. Kim, Y. K. Kim, H. S. Ji, J. H. Beak, y R. Mieremet, “Aerodynamic Characteristics of Horizontal Axis Wind Turbine With Archimedes Spiral Blade”, en *Volume 7B: Fluids Engineering Systems and Technologies*, American Society of Mechanical Engineers, nov. 2013. doi: 10.1115/IMECE2013-62734.
- [20] K. Kim, H. Ji, Y. Kim, Q. Lu, J. Baek, y R. Mieremet, “Experimental and Numerical Study of the Aerodynamic Characteristics of an Archimedes Spiral Wind Turbine

- Blade”, *Energies (Basel)*, vol. 7, núm. 12, pp. 7893–7914, nov. 2014, doi: 10.3390/en7127893.
- [21] A. Safdari y K. C. Kim, “Aerodynamic and Structural Evaluation of Horizontal Archimedes Spiral Wind Turbine”, *Journal of Clean Energy Technologies*, vol. 3, núm. 1, pp. 34–38, ene. 2015.
 - [22] S. Chaudhary, S. Jaiswal, R. Nanda, S. Patel, P. Kumar, V. Dhar y R. Dixit, “Comparison of torque characteristics of Archimedes Wind Turbine evaluated by analytical and experimental study”, *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, vol. 4, núm. 8, pp. 75–78, ago. 2016.
 - [23] M. Ozeh, A. Mishra, y X. Wang, “Mini wind turbine for small scale power generation and storage (Archimedes wind turbine model) ”, *International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2018*, pp. 1–7, nov. 2018.
 - [24] S. Ebrahimi y M. A. Ghassem, “Numerical Aerodynamics Analysis of the of the Archimedes Screw Wind Turbine”, *International Journal Of Multidisciplinary Sciences And Engineering*, vol. 9, núm. 10, pp. 12–15, nov. 2018.
 - [25] H. S. Ji, J. H. Baek, R. Mieremet, Y K. C. Kim, “The Aerodynamic Performance Study on Small Wind Turbine with 500W Class through Wind Tunnel Experiments”, *International Journal of Renewable Energy Sources*, vol. 1, pp. 7–12, 2016.
 - [26] A. T. Mustafa y H. A. Jaleel, “A comparison study between Archimedes spiral turbine and propeller turbine with wind attack angle effect”, 2020, p. 020058. doi: 10.1063/5.0000144.
 - [27] C. Ostia, J. M. Martinez, K. T. Coderes, G. J. Estacio, A. R. Ramchahi, y J. V. Pulido, “Development of a Dual Wind Turbines using the Savonius and Archimedes Spiral Principle”, en *2018 IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*, IEEE, nov. 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/HNICEM.2018.8666238.
 - [28] R. Suntivarakorn, S. Wanchat, y W. Monatrakul, “An Experimental Study of Electricity Generation Using a Horizontal Spiral Turbine”, *Energy Procedia*, vol. 100, pp. 532–536, nov. 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.10.215.
 - [29] H. S. Ji, L. Qiang, J. H. Beak, R. Mieremet, y K. C. Kim, “Effect of the wind direction on the near wake structures of an Archimedes spiral wind turbine blade”, *J Vis (Tokyo)*, vol. 19, núm. 4, pp. 653–665, nov. 2016, doi: 10.1007/s12650-016-0356-8.

- [30] S.-M. Yang, H.-S. Ji, D.-S. Shim, J.-H. Baek, y S.-H. Park, “Conical roll-twist-bending process for fabrication of metallic Archimedes spiral blade used in small wind power generator”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 4, núm. 4, pp. 431–439, oct. 2017, doi: 10.1007/s40684-017-0048-4.
- [31] A. M. Kamal, M. A. A. Nawar, Y. A. Attai, y M. H. Mohamed, “Archimedes Spiral Wind Turbine performance study using different aerofoiled blade profiles: Experimental and numerical analyses”, *Energy*, vol. 262, p. 125567, ene. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.125567.
- [32] S. S. Rao, K. Shanmukesh, M. K. Naidu, y P. Kalla, “Design and Analysis of Archimedes Aero-Foil Wind Turbine Blade for Light and Moderate Wind Speeds”, *International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering (IJRMEE)*, vol. 5, núm. 8, pp. 1–5, ago. 2018.
- [33] Y. Patil, “Design, Fabrication And Analysis Of Fibonacci Spiral Horizontal Axis Wind Turbine”, *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, vol. 5, núm. |, pp. 1–4, ene. 2018.
- [34] H. Eva Hertnacahyani y S. Widiyanto Agung, “Simulation of Opening Angle of Archimedes Wind Turbine Design Based on the Fibonacci Series”, *International Journal of Engineering, Science & Information Technology (IJESTY)*, vol. 2, núm. 1, pp. 50–57, 2022.
- [35] H. Jang, D. Kim, Y. Hwang, I. Paek, S. Kim, y J. Baek, “Analysis of Archimedes Spiral Wind Turbine Performance by Simulation and Field Test”, *Energies (Basel)*, vol. 12, núm. 24, p. 4624, dic. 2019, doi: 10.3390/en12244624.
- [36] A. Labib, A. AbdelGawad, y M. Nasseif, “Effect of Aspect Ratio on Aerodynamic Performance of Archimedes Spiral Wind Turbine”, *The Egyptian International Journal of Engineering Sciences and Technology*, vol. 32, núm. Mechanical Engineering, pp. 66–72, nov. 2020, doi: 10.21608/eijest.2020.45256.1017.
- [37] N. Krishna, “Design And Flow Simulation Of An Archimedean Spiral-Type Wind Turbine Blade For Determining Velocity And Pressure Profile”, *EPRA International Journal of Multidisciplinary Research (IJMR)*, vol. 7, núm. 12, pp. 74–81, dic. 2021.
- [38] S. Sudip, B. Ashish, B. Hari Prasad, y N. Upama, “Design, CFD Analysis and Modelling of Archimedean-Spiral type Wind Turbine”, *Proceedings of IOE Graduate Conference*, vol. 6, pp. 579–587, may 2019.
- [39] A. Bhattarai, H. P. Bashyal, S. Sapkota, y U. Nepal, “Design, CFD Analysis and Modelling of Archimedean Spiral-Type Wind Turbine”, agosto de 2016.

- [40] M. A. A. Nawar, H. S. A. Hameed, A. Ramadan, Y. A. Attai, y M. H. Mohamed, “Experimental and numerical investigations of the blade design effect on Archimedes Spiral Wind Turbine performance”, *Energy*, vol. 223, p. 120051, may 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120051.
- [41] A. M. Kamal, M. A. A. Nawar, Y. A. Attai, y M. H. Mohamed, “Blade design effect on Archimedes Spiral Wind Turbine performance: Experimental and numerical evaluations”, *Energy*, vol. 250, p. 123892, jul. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123892.
- [42] I. Abdelghafar, A. G. Refaie, E. Kerikous, D. Thévenin, y S. Hoerner, “Optimum geometry of seashell-shaped wind turbine rotor: Maximizing output power and minimizing thrust”, *Energy Convers Manag*, vol. 292, p. 117331, sep. 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.117331.
- [43] H. Hamid y R. M. Abd El Maksoud, “A comparative examination of the aerodynamic performance of various seashell-shaped wind turbines”, *Heliyon*, vol. 9, núm. 6, p. e17036, jun. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17036.
- [44] A. G. Refaie, H. S. Abdel Hameed, M. A. A. Nawar, Y. A. Attai, y M. H. Mohamed, “Qualitative and quantitative assessments of an Archimedes Spiral Wind Turbine performance augmented by A concentrator”, *Energy*, vol. 231, p. 121128, sep. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121128.
- [45] H. S. Abdel Hameed, I. Hashem, M. A. A. Nawar, Y. A. Attai, y M. H. Mohamed, “Shape optimization of a shrouded Archimedean-spiral type wind turbine for small-scale applications”, *Energy*, vol. 263, p. 125809, ene. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.125809.
- [46] A. G. Refaie, H. S. A. Hameed, M. A. A. Nawar, Y. A. Attai, y M. H. Mohamed, “Comparative investigation of the aerodynamic performance for several Shrouded Archimedes Spiral Wind Turbines”, *Energy*, vol. 239, p. 122295, ene. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122295.
- [47] A. Arzuaga, A. Estivariz, O. Fernández, K. Gubía, A. Plaza, G. Abad y D. Cabezuero Romero, “Low-Cost Maximum Power Point Tracking Strategy and Protection Circuit Applied to an Ayanz Wind Turbine with Screw Blades”, *Energies (Basel)*, vol. 16, núm. 17, p. 6204, ago. 2023, doi: 10.3390/en16176204.
- [48] A. Salim y N. Al-Murshedi, “Nexus : Journal of Innovative Studies of Engineering Science (JISES) Spiral Wind Turbine Investigations for Various Material Constriction Based on Static and Dynamic Analyses”. [En línea]. Disponible en: <http://innosci.org/>

- [49] K. Ganvir, P. Bomble, A. Bagde, A. Chavhan, R. Gajbhiye, y A. Chakole, “Design and Analysis of Spiral Wind Turbine with Various Wind Speed”, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 9, núm. 3, pp. 2099–2103, mar. 2022.
- [50] L. Capalbo, “Energías limpias y Renovables”, 2009, *UNIDA, Argentina*.
- [51] Storyset, “Concepto de turbina eólica”, Freepik.
- [52] U. Moreno Regan, “Rehabilitación Del Túnel De Viento Subsónico C2-00 Y Determinación Del Coeficiente De Resistencia De Diferentes Modelos De Prueba En El Tunel”, IPN, México, 2008.
- [53] D. Almazo Pérez, L. Royval Bustillos, A. Ramírez Reyes, C. A. Ochoa Ortiz, y B. Anaya, “Determinación del número mínimo de álabes para un estator, necesario para que el flujo que incide en los bordes delanteros de los álabes de un rotor sea desviado a un ángulo de máxima eficiencia mediante Dinámica de Fluidos Computacional”, Ciudad Juárez, dic. 2021.
- [54] J. Moragues y A. Rapallini, “ENERGIA EOLICA”, 2003, *IAE, Argentina*.
- [55] J. F. Manwell, J. G. McGowan, y A. L. Rogers, *Wind Energy Explained Theory, Design And Application*, 2a ed. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [56] R. Avila Ponce, “Espirale de Fibonacci: Composición basada en naturaleza”, About Español.
- [57] N. Aguirre, “La espiral de Arquímedes en un proyecto de modelación matemática”, *Repositorio Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC)* , vol. 23, pp. 1–10, jul. 2020.
- [58] D. Cychosz, “Demystifying Fluid Turbulence, Velocity and Flow Measurement”, Emerson Automation Solutions.
- [59] S. Vaca Cordero y J. Jara Alvear, “Energía eólica en Ecuador.”, en *Energías renovables en el Ecuador. Situación actual, tendencias y perspectivas.*, M. R. Peláez Samaniego y J. L. Espinoza Abad, Eds., Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca, 2015.
- [60] Y. A. Çengel Y J. M. Cimbala, “ANEXO 1: Tablas de las propiedades del aire a 1 atm de presión ”, en *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*, 1a ed., McGraw-Hill, 2006, Tabla A-9.

- [61] J. A. Medrano Hernández y C. Moreno-Figueredo, “Análisis sobre la influencia de la turbulencia en la producción energética de las turbinas eólicas”, *Energética*, vol. 40, núm. 1, pp. 53–62, abr. 2019.
- [62] TSI, “Turbulence Intensity Measurements Applicable Instrument Models: 9555, 9565, 7565, 7575, TA460, TA465, EBT730, PH730, 8715”, el 8 de marzo de 2012, *TSI*.
- [63] Y. Patil, “Design, Fabrication And Analysis Of Fibonacci Spiral Horizontal Axis Wind Turbine”, *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, vol. 5, núm. 1, pp. 1–4, ene. 2018.
- [64] I. 'Moncho, “Procesos de Mezcla en Flujos Turbulentos con Técnicas de la Mecánica de Fluidos Computacional (CFD) ”, Universitat Politècnica de València (UPV), Valencia, 2017.
- [65] J. 'Armijo, “Flujo De Fluidos Compresibles A Través De Tubos De Sección Transversal Constante: Algoritmos De Cálculo Para Gases Ideales”, 2005.
- [66] Ansys, “ Meshing User's Guide - Ansys ”.
- [67] S. Farajyar, F. Ghafoorian, M. Mehrpooya, y M. Asadbeigi, “CFD Investigation and Optimization on the Aerodynamic Performance of a Savonius Vertical Axis Wind Turbine and Its Installation in a Hybrid Power Supply System: A Case Study in Iran”, *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, núm. 6, mar. 2023, doi: 10.3390/su15065318.
- [68] N. Baker, G. Kelly, y P. D. O'Sullivan, “A grid convergence index study of mesh style effect on the accuracy of the numerical results for an indoor airflow profile”, *International Journal of Ventilation*, vol. 19, núm. 4, pp. 300–314, oct. 2020, doi: 10.1080/14733315.2019.1667558.
- [69] S. Rodriguez, *Applied Computational Fluid Dynamics and Turbulence Modeling*. Cham: Springer International Publishing, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-28691-0.
- [70] A. 'Galvis, “Modelamiento y simulación de la formación de hielo en tuberías usando CFD ”, Universidad de los Andes , Bogotá D.C, 2018.
- [71] B. Szabó y I. Babuska, *Finite Element Analysis: Method, Verification and Validation*, 2a ed. Wiley, 2021.
- [72] E. Barkanov, *Introduction to the Finite Element Method*. Riga: Institute of Materials and Structures , 2001.
- [73] A. H. M. M. Morshed, S. Shafquat, I. Z. Mim, M. S. Hossain, y M. S. I. Masum, “Dimensional and Numerical Analysis of Power Prediction of a Real-Scale Archimedes Spiral Wind Turbine Based on the Experimental Data of Small-Scaled

Models”, en *2021 IEEE 4th International Conference on Power and Energy Applications, ICPEA 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 99–103. doi: 10.1109/ICPEA52760.2021.9639362.

- [74] A. De Meij, J. Vinuesa, V. Maupas, J. Waddle, I. Price, B. Yaseen y A. Ismail, “Wind energy resource mapping of Palestine”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 551–562, abr. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.090.
- [75] G. Esnaola, A. Ulazia, J. Sáenz, y G. Ibarra-Berastegi, “Future changes of global Annual and Seasonal Wind-Energy Production in CMIP6 projections considering air density variation”, *Energy*, vol. 307, p. 132706, oct. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.132706.
- [76] Comisión Federal de Electricidad CFE, “Boletín de Prensa: Consumo de equipos eléctricos”, Coordinación de Comunicación Corporativa.

Apéndice A

Anexos