

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
INFORMÁTICA Y MECÁNICA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA



TESIS

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE UN DISEÑO DE TURBINA
EOLICA MEDIANTE EL USO DE UN TUNEL DE VIENTO**

PRESENTADO POR:

Br. VLADIMIR WILSON HANCCO

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO MECÁNICO**

ASESOR:

Dr. EFRAIN WALTER SEQUEIROS PÉREZ

CUSCO – PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor EFRAIN WALTER SEQUEIROS PÉREZ
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE UN
DISEÑO DE TURBINA EOLICA MEDIANTE EL USO DE UN TUNEL
DE VIENTO

Presentado por: VLADIMIR WILSON HANCCO DNI N° 48308078 ;
presentado por: DNI N°:
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO MECÁNICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 0.3 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de
Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 6%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	☒
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	☐
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	☐

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 15 de JULIO de 2026


Firma

Post firma EFRAIN WALTER SEQUEIROS PÉREZ

Nro. de DNI 23853321

ORCID del Asesor 0000-0002-0645-683X

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:607969841

VLADYMIRO HANCO

tesis vladly biblioteca.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:607969841

Fecha de entrega

14 jul 2026, 10:41 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

14 jul 2026, 11:18 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

tesis vladly biblioteca.pdf

Tamaño del archivo

4.7 MB

189 páginas

37.025 palabras

200.179 caracteres

6% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

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

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 4%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 4%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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

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

DEDICATORIA

*A mis seres queridos, cuyo respaldo incondicional
y cariño sostienen cada uno de mis pasos, en los
momentos de triunfo y también en los de desafío.*

*A mi familia, pilar fundamental de mi vida, cuya
paciencia y estímulo permanente me inspiran a perseverar
y alcanzar cada una de mis metas*

Vladimir Wilson

AGRADECIMIENTO

A Dios, por concederme la vida, la salud y la fortaleza necesarias para culminar esta etapa académica. Su guía y protección han sido fundamentales para perseverar y avanzar a pesar de las dificultades.

A mi madre, por su amor incondicional, por su esfuerzo permanente y por ser un pilar esencial en mi formación personal y profesional. Gracias por cada sacrificio, por tu motivación constante y por creer siempre en mí.

A la memoria de mi padre, quien desde el cielo continúa iluminando y guiando mis pasos. Su ejemplo, enseñanzas y valores han sido una inspiración constante durante el desarrollo de esta tesis y en cada logro obtenido.

Mi profundo agradecimiento a mi asesor Dr. Efraín Walter Sequeiros Pérez, por su dedicación, paciencia y compromiso académico. Su orientación técnica y humana ha sido indispensable para llevar a cabo esta investigación con rigurosidad y alcanzar los objetivos propuestos.

A la Carrera Profesional de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), por brindarme una formación sólida, por fomentar el espíritu científico y por permitirme desarrollar este trabajo que representa un aporte al conocimiento en el campo de la energía eólica.

A todos quienes, directa o indirectamente, contribuyeron con su apoyo, palabras de aliento o colaboración en cualquier etapa del proceso, mi sincero agradecimiento.

Vladimir Wilson

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTO	II
ÍNDICE	III
RESUMEN	XIV
ABSTRAC	XV
INTRODUCCIÓN	XVI
CAPITULO I	1
MARCO REFERENCIAL.....	1
1.1 Titulo.....	1
1.2 Responsable	1
1.3 Asesor	1
1.4 Ámbito Geográfico	1
1.5 Fundamentación Del Problema.....	2
1.6 Formulación Del Problema.....	3
1.6.1 Formulación Del Problema	3
1.6.2 Problemas Específicos	3
1.7 Objetivos de la Investigación.....	4
1.7.1 Objetivo General.....	4
1.7.2 Objetivos Específicos.....	4
1.8 Justificación	5
1.9 Hipótesis de Investigación.....	6
1.9.1 Hipótesis General.....	6
1.9.2 Variables de Investigación.....	6
Variables independientes.....	6
Variables dependientes.....	6
1.9.3 Operacionalización de Variables.	7
1.10 Metodología de Investigación.....	8
1.10.1 Tipo de Investigación.....	8
1.10.2 Enfoque de Investigación.....	8
1.10.3 Nivel de Investigación	8
1.10.4 Diseño de la Investigación	8
1.10.5 Población y Muestra	11
1.10.6 Técnicas de Recolección de Datos.....	11
1.10.7 Procesamiento de Datos.....	11

1.10.8	Técnicas de Análisis de Datos	12
1.10.9	Alcances y limitaciones	13
CAPITULO II		14
MARCO TEÓRICO.....		14
2.1	Antecedentes Nacionales	14
2.2	Antecedentes Internacionales	16
2.3	Fundamentos teóricos	20
2.3.1	Turbinas Eólicas.....	20
2.3.2	Turbinas Eólicas de Eje Horizontal	20
2.3.3	Turbinas Eólicas de Eje Vertical.....	23
2.3.4	Turbinas Eólicas Basadas en el Principio de Arrastre	26
2.3.5	Energía Eólica.....	27
2.3.6	Teoría del Impulso de Betz	29
2.3.7	Modelo Matemático Del Rotor	30
CAPITULO III.....		40
DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO GEOMÉTRICO		40
3.1	Condiciones Ambientales de Operación.....	40
3.2	Aplicación de las Turbinas Eólicas Existentes.	41
3.2.1	Aplicación de Turbinas Eólicas de Eje Horizontal.	41
3.2.2	Aplicación de Turbinas Eólicas de Eje Vertical.	44
3.3	Resumen Ventajas y Desventajas de Turbinas Eólicas.	46
3.4	Curva de Funcionamiento Según su Coeficiente de Potencia en Turbinas Eólicas.	47
3.5	Selección del Tipo de Turbina.	48
3.6	Consideraciones Para Pruebas Experimentales y Construcción de Prototipos.....	50
3.6.1	Túnel de Viento.....	50
3.6.2	Características del Túnel de Viento	50
3.6.3	Similitud Geométrica.	51
3.6.4	Similitud de Flujo	51
3.6.5	Similitud Dinámica.	52
3.6.6	Efecto de Bloqueo.....	52
3.7	Parámetros Geométricos de la Turbina Seleccionada	52
3.7.1	Área de la Sección Transversal del Túnel de Viento.....	52
3.7.2	Relación Área Transversal de la Turbina y Área Transversal Túnel de Viento	52
3.7.3	Área de la Sección Transversal de la Turbina	53

3.7.4	Relación Altura – Diámetro de la Turbina.....	53
3.7.5	Diámetro de la Turbina	54
3.7.6	Altura de la Turbina	54
3.7.7	Numero de Palas	54
3.7.8	Perfil Alar.....	55
3.7.9	Solidez de la Turbina	55
3.7.10	Cuerda del Perfil	55
3.7.11	Angulo Helicoidal.....	56
3.7.12	Diseño Geométrico del Perfil Alar	58
3.7.13	Potencia Ideal Desarrollada Por la Turbina	62
3.8	Propuesta de Diseño de la Turbina.	62
CAPITULO IV.....		64
DESARROLLO DEL DISEÑO AERODINÁMICO		64
4.1	Cálculo de Viscosidad Cinemática.	64
4.2	Número de Reynolds.	64
4.3	Coeficiente de Sustentación.....	64
4.4	Coeficiente de Arrastre.....	65
4.5	Número de Tubos de Corriente Verticales (Nv) y Horizontales (Nh). 66	
4.6	Implementación Del Algoritmo.....	66
4.6.1	Código Computacional Del Modelo Matemático DMST.....	66
4.6.2	Resultados del Cálculo Desarrollado por el Código Matlab.....	69
4.7	Carga Critica.....	71
CAPITULO V		74
DISEÑO MECÁNICO.....		74
5.1	Esquema de Operación.	74
5.2	Materiales para la fabricación de los componentes.	75
5.2.1	Material de las Palas	75
5.2.2	Material del eje	75
5.2.3	Material de Brazos y Soportes	76
5.2.4	Material de Estructura Soporte	76
5.3	Análisis de aceleración	77
5.4	Cargas de viento sobre el eje	78
5.5	Diseño del eje de la turbina.	80
5.5.1	Diagrama de fuerzas cortantes y momento flector en el eje.	82
5.5.2	Cálculo del diámetro del eje.	84

5.6	Cálculo de deflexión en los brazos.	89
7.7.3.	Selección de rodamiento.	93
CAPITULO VI.....		94
ESPECIFICACIONES TECNICAS		94
6.1	Especificaciones Técnicas de Material.	94
6.1.1	Generalidades.....	94
6.1.2	Criterios técnicos para la selección de materiales.....	94
6.1.3	Resumen de materiales seleccionados	95
6.1.4	Especificaciones del material de las palas helicoidales	95
6.1.5	Especificaciones del material de brazos, soportes y acoples	96
6.1.6	Especificaciones del eje central	97
6.1.7	Especificaciones de rodamientos y bancada	98
6.1.8	Especificaciones de la estructura soporte	98
6.1.9	Especificaciones del dispositivo de freno Prony	99
6.1.10	Especificaciones de uniones, adhesivos y acabado superficial.....	100
6.2	Especificaciones Técnicas de Fabricación.....	100
6.2.1	Flujo general de fabricación.....	101
6.2.2	Equipos, Herramientas e Instrumentos Requeridos	101
6.2.3	Preparación del modelo CAD de las palas.....	102
6.2.4	Fabricación de palas helicoidales.....	103
6.2.5	Ensamblaje de palas segmentadas	105
6.2.6	Fabricación de brazos, soportes y freno Prony mediante impresión 3D y mecanizado.	106
6.2.7	Mecanizado CNC de bancada tipo chumacera	108
6.2.8	Fabricación de estructura soporte en aluminio	110
6.2.9	Ensamblaje del rotor	112
6.2.10	Montaje de rodamientos, bancada y estructura soporte	112
6.2.11	Balanceo estático	113
6.2.12	Control dimensional y criterios de aceptación.....	113
CAPITULO VII		115
ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y COMPORTAMIENTO		115
7.1	Montaje Experimental	115
7.2	Procedimiento Experimental	117
7.2.1	Toma de Datos Experimentales	118
7.2.2	Análisis Estadístico de las Mediciones	125
7.2.3	Tendencia grafica de los resultados experimentales de las 3 turbinas.	129
7.2.4	Resultados Estadísticos de Ensayos Experimentales.....	131
7.2.5	Comparación de Graficas Teórico - Experimental	131
CAPITULO VIII.....		139

EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	139
8.1 Costos de Materiales y Mano de Obra.....	139
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	141
8.1. Conclusiones.....	141
8.2. Recomendaciones	142
REFERENCIA BIBLIOGRAFICA	145
ANEXOS.....	150
ANEXO 1: PROTOCOLO DE ENSAYOS EXPERIMENTALES.....	150
ANEXO 2: FICHA TECNICA DEL RODAMIENTO.....	154
ANEXO 3: MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	155
ANEXO 4: FICHA TECNICA DE EQUIPOS UTILIZADOS PARA MEDICION DE PARAMETROS	156
ANEXO 5: ALGORITMO COMPUTACIONAL	159
ANEXO 6: PLANOS.....	166

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: <i>Rango de velocidades de viento y densidad de potencia.</i>	28
Tabla 2: <i>Condiciones ambientales promedio de operación región de cusco.</i>	41
Tabla 3: <i>Ventajas y desventajas de las turbinas eólicas de eje horizontal</i>	42
Tabla 4: <i>Ventajas y desventajas de las turbinas eólicas de eje vertical</i>	44
Tabla 5: <i>Ventajas y desventajas de las turbinas eólicas de eje vertical y horizontal</i>	46
Tabla 6: <i>Ventajas y desventajas de las turbinas eólicas de eje vertical y horizontal</i>	48
Tabla 7: <i>Coordenadas para el perfil alar NACA0015 con cuerda $c=0.03$.</i>	59
Tabla 8: <i>Coordenadas para el perfil alar NACA0015 con cuerda $c=0.04$.</i>	60
Tabla 9: <i>Parámetros geométricos de la turbina eólica.</i>	63
Tabla 10: <i>Parámetros de entrada.</i>	68
Tabla 11: <i>Resultado del coeficiente de potencia y TSR para $c_1=0.03m$.</i>	69
Tabla 12: <i>Resultado del coeficiente de potencia y TSR para $c_2=0.04m$.</i>	70
Tabla 13: <i>Propiedades mecánicas y físicas de la madera pino.</i>	75
Tabla 14: <i>Propiedades mecánicas y físicas del acero ASTM A36.</i>	75
Tabla 15: <i>Propiedades mecánicas y físicas del PLA.</i>	76
Tabla 16: <i>Propiedades mecánicas del aluminio.</i>	76
Tabla 17: <i>Factores de seguridad recomendado por varios autores.</i>	87
Tabla 18: <i>Materiales seleccionados según cada componente.</i>	95
Tabla 19: <i>Propiedades mecánicas de a resina epóxica.</i>	96
Tabla 20: <i>Propiedades mecánicas y físicas de la madera pino.</i>	96
Tabla 21: <i>Propiedades mecánicas del PLA.</i>	97
Tabla 22: <i>Propiedades mecánicas y físicas del acero ASTM A36.</i>	97
Tabla 23: <i>Propiedades mecánicas del aluminio y rodamientos.</i>	98
Tabla 24: <i>Propiedades mecánicas del aluminio.</i>	99
Tabla 25: <i>Propiedades mecánicas de las uniones atornilladas, adhesivos y acabado superficial.</i>	100
Tabla 26: <i>Equipos e instrumentos requeridos.</i>	101
Tabla 27: <i>Equipos e instrumentos requeridos.</i>	103
Tabla 28: <i>Parámetros de fabricación de brazos y freno prony.</i>	106

Tabla 29. <i>Parámetros de fabricación de bancada tipo chumacera.</i>	109
Tabla 30. <i>Parámetros de fabricación de estructura soporte.</i>	110
Tabla 31. <i>Control dimensional.</i>	113
Tabla 32. <i>Toma de datos a $v=4\text{m/s}$, para la turbina con cuerda 3cm y ángulo helicoidal 60°.</i> 118	
Tabla 33. <i>Toma de datos a $v=5\text{m/s}$, para la turbina con cuerda 3cm y ángulo helicoidal 60°.</i> 118	
Tabla 34. <i>Toma de datos a $v=6\text{m/s}$, para la turbina con cuerda 3cm y ángulo helicoidal 60°.</i> 119	
Tabla 35. <i>Toma de datos a $v=3\text{m/s}$, para la turbina con cuerda 4cm y ángulo helicoidal 60°.</i> 120	
Tabla 36. <i>Toma de datos a $v=4\text{m/s}$, para la turbina con cuerda 4cm y ángulo helicoidal 60°.</i> 120	
Tabla 37. <i>Toma de datos a $v=5\text{m/s}$, para la turbina con cuerda 4cm y ángulo helicoidal 60°.</i> 121	
Tabla 38. <i>Toma de datos a $v=6\text{m/s}$, para la turbina con cuerda 4cm y ángulo helicoidal 60°.</i> 121	
Tabla 39. <i>Toma de datos a $v=3\text{m/s}$, para la turbina con cuerda 4cm y ángulo helicoidal 60°.</i> 122	
Tabla 40. <i>Toma de datos a $v=4\text{m/s}$, para la turbina con cuerda 4cm y ángulo helicoidal 60°.</i> 123	
Tabla 41. <i>Toma de datos a $v=5\text{m/s}$, para la turbina con cuerda 4cm y ángulo helicoidal 60°.</i> 123	
Tabla 42. <i>Toma de datos a $v=6\text{m/s}$, para la turbina con cuerda 4cm y ángulo helicoidal 60°.</i> 124	
Tabla 43. <i>Análisis estadístico de media, desviación estándar, mínimos y máximos a velocidad de $v=4\text{m/s}$.</i>	125
Tabla 44. <i>Análisis estadístico de media, desviación estándar, mínimos y máximos a velocidad de $v=5\text{m/s}$.</i>	125
Tabla 45. <i>Análisis estadístico de media, desviación estándar, mínimos y máximos a velocidad de $v=6\text{m/s}$.</i>	126
Tabla 46. <i>Análisis estadístico de media, desviación estándar, mínimos y máximos a velocidad de $v=3\text{m/s}$.</i>	126
Tabla 47. <i>Análisis estadístico de media, desviación estándar, mínimos y máximos a velocidad de $v=4\text{m/s}$.</i>	126
Tabla 48. <i>Análisis estadístico de media, desviación estándar, mínimos y máximos a velocidad de $v=5\text{m/s}$.</i>	127
Tabla 49. <i>Análisis estadístico de media, desviación estándar, mínimos y máximos a velocidad de $v=6\text{m/s}$.</i>	127
Tabla 50. <i>Análisis estadístico de media, desviación estándar, mínimos y máximos a velocidad de $v=3\text{m/s}$.</i>	127

Tabla 51. <i>Análisis estadístico de media, desviación estándar, mínimos y máximos a velocidad de $v=4m/s$.</i>	128
Tabla 52. <i>Análisis estadístico de media, desviación estándar, mínimos y máximos a velocidad de $v=5m/s$.</i>	128
Tabla 53. <i>Análisis estadístico de media, desviación estándar, mínimos y máximos a velocidad de $v=6m/s$.</i>	129
Tabla 54. <i>Relación de velocidad punta y coeficiente de potencia teóricos para $c_1=0.03m$.</i>	132
Tabla 55. <i>Relación de velocidad punta y coeficiente de potencia experimentales para $c_1=0.03m$.</i>	133
Tabla 56. <i>Relación de velocidad punta y coeficiente de potencia teóricos para $c_2=0.04m$.</i>	134
Tabla 57. <i>Relación de velocidad punta y coeficiente de potencia experimentales para $c_2=0.04m$.</i>	135
Tabla 58. <i>Relación de velocidad punta y coeficiente de potencia teóricos para $c=0.04m$.</i>	136
Tabla 59. <i>Relación de velocidad punta y coeficiente de potencia experimentales para $c=0.04m$.</i>	137
Tabla 60. <i>Costo de materiales utilizados para la fabricación de la turbina eólica.</i>	139
Tabla 61. <i>Costos de mano de obra para la elaboración de la turbina eólica.</i>	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Ubicación del laboratorio de energías de la escuela profesional de Ingeniería Mecánica.</i>	1
Figura 2. <i>Flujograma de actividades de la presente investigación.</i>	10
Figura 3. <i>Turbina eólica monopala o pendular.</i>	21
Figura 4. <i>Turbina eólica bipala.</i>	22
Figura 5. <i>Turbina eólica tripala.</i>	23
Figura 6. <i>Turbina eólica Darrieus de tipo Giromill.</i>	24
Figura 7. <i>Turbina eólica Crossflex.</i>	25
Figura 8. <i>Rotor H helicoidal: (a) turbina de agua Gorlov, (b) y (c) turbina eólica QuietRevolution.</i>	25
Figura 9. <i>Turbina eólica Savonius tradicional.</i>	26
Figura 10. <i>Prototipo de turbina eólica de eje vertical Zephyr: (a) ilustración y (b) geométrica.</i>	27
Figura 11. <i>Flujo a través de un disco.</i>	27
Figura 12. <i>Valor de C_p en función del cociente U_2/U_1.</i>	29
Figura 13. <i>Esquema modelo del doble disco actuador de múltiples tubos de corriente.</i>	30
Figura 14. <i>Tubos de corriente horizontal y vertical.</i>	32
Figura 15. <i>Esquema de fuerzas aerodinámicas que actúan sobre el perfil aerodinámico de la pala.</i>	35
Figura 16. <i>Mapa eólico del Perú.</i>	40
Figura 17. <i>Coeficiente de potencia en función del TSR en turbinas eólicas.</i>	47
Figura 18. <i>Túnel de viento.</i>	51
Figura 19. <i>Coeficiente de rendimiento del eje vertical Darrieus para varios ángulos de hélice.</i>	57
Figura 20. <i>Coeficiente de par para configuraciones rectas y helicoidales a 60°.</i>	57
Figura 21. <i>Grafica generada según la tabla 7.</i>	61
Figura 22. <i>Grafica generada según la tabla 8.</i>	61
Figura 23. <i>Coeficiente de sustentación (C_l), para un número de Reynolds $Re_p=42545.29$.</i>	65
Figura 24. <i>Coeficiente de arrastre (C_d), para un número de Reynolds $Re_p=42545.29$.</i>	65
Figura 25. <i>Diagrama de flujo del modelo matemático DMST.</i>	67
Figura 26. <i>Fuerza tangencial vs ángulo azimutal a una velocidad de viento $V=11\text{m/s}$.</i>	71

Figura 27. <i>Fuerza normal vs ángulo azimutal a una velocidad de viento $V=11\text{m/s}$.</i>	71
Figura 28. <i>Distribución de fuerzas en el rotor.</i>	72
Figura 29. <i>Distribución de fuerzas en el rotor.</i>	73
Figura 30. <i>Esquema de la turbina eólica.</i>	74
Figura 31. <i>Coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds.</i>	79
Figura 32. <i>Diagrama de cuerpo libre del eje de la turbina.</i>	80
Figura 33. <i>Diagramas de: (a)cargas en el eje, (b) fuerzas cortantes, (b) momento flector.</i>	83
Figura 34. <i>Configuración geométrica del brazo</i>	89
Figura 35. <i>Esquema de la sección transversal del brazo.</i>	90
Figura 36. <i>Esquema del brazo sometido a cargas por el peso de la pala y a flexión.</i>	91
Figura 37. <i>Palas helicoidales fabricadas en resina epóxica.</i>	105
Figura 38. <i>Brazos fabricados en material PLA.</i>	107
Figura 39. <i>fabricación del dispositivo freno prony.</i>	107
Figura 40. <i>Generación de las trayectorias de mecanizado freno prony, con una fresa de 4mm.</i>	108
Figura 41. <i>Fabricación de bancada tipo chumacera en material aluminio.</i>	109
Figura 42. <i>Generación de las trayectorias de mecanizado con una fresa de 4mm.</i>	110
Figura 43. <i>Simulación computacional de la estructura soporte.</i>	111
Figura 44. <i>Estructura soporte fabricado en aluminio.</i>	111
Figura 45. <i>Turbina Darrieus Helicoidal a 60°, con diámetro 0.185m, altura 0.185 y cuerda 0.03m.</i>	115
Figura 46. <i>Turbina Darrieus Helicoidal a 60°, con diámetro 0.185m, altura 0.185 y cuerda 0.04m.</i>	116
Figura 47. <i>Turbina Darrieus Helicoidal a 60°, con diámetro 0.260m, altura 0.260 y cuerda 0.04m.</i>	116
Figura 48. <i>Desarrollo del experimento e instrumentos usados (tacómetro, anemómetro y sensor de tensión).</i>	117
Figura 49. <i>La figura muestra la tendencia del Coeficiente de potencia en función de la velocidad del viento de las tres turbinas ensayadas.</i>	129
Figura 50. <i>La figura muestra la tendencia de la Potencia mecánica en función de la velocidad del viento de las tres turbinas ensayadas.</i>	130

Figura 51. <i>La figura muestra la tendencia del torque dinámico en función de la velocidad del viento de las tres turbinas ensayadas.</i>	130
Figura 52. <i>La figura muestra la tendencia de la relación de velocidad punta (TSR) en función de la velocidad del viento de las tres turbinas ensayadas.</i>	131
Figura 53. <i>Grafica de resultados teóricos y experimentales para $c_1=0.03m$.</i>	133
Figura 54. <i>Grafica de resultados teóricos y experimentales para $c_2=0.04m$.</i>	135
Figura 55. <i>Grafica de resultados teóricos y experimentales para $c_1=0.03m$.</i>	137

RESUMEN

La presente investigación desarrolla el análisis experimental de una turbina eólica, empleando el túnel de viento del Laboratorio de Energías de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de la UNSAAC. El trabajo comprende la determinación geométrica, diseño aerodinámico mediante el modelo Double Multiple Streamtube (DMST), diseño mecánico, fabricación del prototipo y evaluación experimental bajo flujo controlado.

El diseño consideró las condiciones atmosféricas de la región Cusco, con densidad del aire de 0.823 kg/m^3 , presión atmosférica de 0.875 bar y velocidades entre 3 y 6 m/s. La geometría seleccionada corresponde a una turbina Darrieus helicoidal de tres palas, perfil NACA 0015, ángulo helicoidal de 60° , cuerdas de 0.03 m y 0.04 m, y bloqueo del túnel menor al 10 %.

Los resultados teóricos mediante el modelo DMST indicaron un C_p máximo de 0.316 a $TSR = 0.977$ para cuerda de 0.03 m, y $C_p = 0.3327$ a $TSR = 0.8845$ para cuerda de 0.04 m. Experimentalmente, el mejor desempeño correspondió al rotor de 0.260 m de diámetro y altura, cuerda de 0.04 m y ángulo helicoidal de 60° , alcanzando a 6 m/s: 100 RPM, torque de 4.15 N.mm, potencia de 0.0452W, $C_p = 0.0474$ y $TSR = 0.1937$.

El análisis mecánico verificó la resistencia de los componentes principales, empleando PLA, acero ASTM A36 y aluminio. La evaluación económica determinó un costo total de fabricación de S/ 874.00. En conjunto, los resultados demuestran que el diseño propuesto es funcional y viable para fines académicos, experimentales y de investigación aplicada en vientos de baja velocidad.

Palabras clave: Turbina eólica, Turbina de eje vertical, Turbina de eje horizontal, Túnel de viento, Coeficiente de potencia.

ABSTRAC

This research presents the experimental analysis of a wind turbine, using the wind tunnel at the Energy Laboratory of the School of Mechanical Engineering at UNSAAC. The work includes geometric determination, aerodynamic design using the Double Multiple Streamtube (DMST) model, mechanical design, prototype fabrication, and experimental evaluation under controlled flow.

The design considered the atmospheric conditions of the Cusco region, with an air density of 0.823 kg/m^3 , atmospheric pressure of 0.875 bar, and wind speeds between 3 and 6 m/s. The selected geometry corresponds to a three-bladed helical Darrieus turbine with a NACA 0015 airfoil, a helical angle of 60° , chords of 0.03 m and 0.04 m, and tunnel obstruction of less than 10%.

Theoretical results using the DMST model indicated a maximum C_p of 0.316 at $TSR = 0.977$ for a chord of 0.03 m, and $C_p = 0.3327$ at $TSR = 0.8845$ for a chord of 0.04 m. Experimentally, the best performance corresponded to the rotor with a diameter and height of 0.260 m, a chord of 0.04 m, and a helical angle of 60° , achieving at 6 m/s: 100 RPM, a torque of 4.15 N·mm, a power of 0.0452W, $C_p = 0.0474$, and $TSR = 0.1937$.

Mechanical analysis verified the strength of the main components, using PLA, ASTM A36 steel, and aluminum. The economic evaluation determined a total manufacturing cost of S/ 874.00. Taken together, the results demonstrate that the proposed design is functional and viable for academic, experimental, and applied research purposes in low-speed winds.

Keywords: Wind turbine, Vertical axis turbine, Horizontal axis turbine, Wind tunnel, Power coefficient.

INTRODUCCIÓN

La presente tesis tiene como propósito desarrollar el análisis experimental de una turbina eólica de eje vertical tipo Darrieus helicoidal, empleando un túnel de viento para validar su comportamiento aerodinámico. El estudio se orienta al aprovechamiento de vientos de baja velocidad característicos de la región Cusco y aporta una metodología de diseño, fabricación y evaluación experimental aplicable a microturbinas eólicas.

El Capítulo I presenta el marco referencial, formulando el problema, objetivos, justificación, hipótesis, variables y metodología. El Capítulo II desarrolla el marco teórico, considerando antecedentes, fundamentos de energía eólica, teoría del impulso de Betz y modelos matemáticos aplicados al análisis de rotores, que sustentan la selección de una turbina Darrieus helicoidal.

En el Capítulo III se determinan los parámetros geométricos de diseño, considerando condiciones ambientales, efecto de bloqueo, relación altura-diámetro, número de palas, perfil NACA 0015, cuerdas de 0.03 m y 0.04 m, y ángulo helicoidal de 60° . En el Capítulo IV se desarrolla el diseño aerodinámico mediante el modelo Double Multiple Streamtube (DMST), obteniéndose valores teóricos de coeficiente de potencia y relación de velocidad punta.

El Capítulo V aborda el diseño mecánico de los componentes principales; mientras que el Capítulo VI describe las especificaciones técnicas de materiales, fabricación, ensamblaje y control dimensional. Finalmente, el Capítulo VII presenta el montaje experimental, procedimiento de ensayo, toma de datos, análisis estadístico y comparación teórico-experimental, con el fin de validar la funcionalidad del diseño y su aplicación en estudios sobre microturbinas eólicas de eje vertical.

CAPITULO I

MARCO REFERENCIAL

1.1 Titulo

“ANALISIS EXPERIMENTAL DE UN DISEÑO DE TURBINA EOLICA MEDIANTE EL USO DE UN TUNEL DE VIENTO”

1.2 Responsable

Bachiller: Wilson Hanco, Vladimir

1.3 Asesor

Dr. Ing.: Sequeiros Pérez, Efraín Walter

1.4 Ámbito Geográfico

La presente investigación se realizará en un túnel de viento ubicado en el laboratorio de energías de la Escuela profesional de Ingeniería Mecánica de la Unsaac.

Figura 1.

Ubicación del laboratorio de energías de la escuela profesional de Ingeniería Mecánica.



Nota: Tomado de Google maps.

1.5 Fundamentación Del Problema

Aunque la conversión de energía eólica está contribuyendo significativamente a la nueva transición hacia una energía limpia, hasta ahora la mayor parte de esta contribución se ha dado a través de grandes parques eólicos. Sin embargo, la reciente demanda de energía distribuida está despertando un nuevo interés en tecnologías de conversión de energía eólica a pequeña escala para aplicaciones residenciales y urbanas (Eltayesh et al., 2023).

La energía eólica representa una alternativa viable y limpia, sin embargo, su eficiencia depende en gran medida del diseño y optimización de las turbinas eólicas. Uno de los principales desafíos en el desarrollo de turbinas eólicas es la validación experimental de su diseño aerodinámico, lo cual permite mejorar su rendimiento y eficiencia en diversas condiciones de viento. La simulación numérica ha avanzado significativamente, pero la validación experimental sigue siendo fundamental para contrastar modelos teóricos y mejorar la predicción del comportamiento real de las turbinas.

En este contexto, los túneles de viento representan una herramienta esencial para analizar experimentalmente el desempeño de los diseños de turbinas eólicas en condiciones controladas. Sin embargo, los pocos estudios experimentales detallados sobre el comportamiento aerodinámico de distintos diseños de turbinas en túneles de viento limitan el desarrollo de modelos más eficientes y adaptables a distintas condiciones climáticas y topográficas.

El presente trabajo de investigación busca evaluar el desempeño y eficiencia del diseño de una turbina. Asimismo, permitirá validar diseños teóricos, mejorar la eficiencia energética de turbinas eólicas sometidos a diversas condiciones ambientales.

1.6 Formulación Del Problema

1.6.1 Formulación Del Problema

¿Cómo validar la funcionalidad y eficiencia aerodinámica del diseño de una turbina eólica mediante el uso del túnel de viento de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de la Unsaac?

1.6.2 Problemas Específicos

- ¿De qué manera se pueden definir los parámetros aerodinámicos de diseño de la turbina eólica?
- ¿Cómo dimensionar la geometría y perfil alar de la turbina eólica?
- ¿Cómo dimensionar y obtener los componentes mecánicos de la turbina eólica?
- ¿Cómo validar la funcionalidad de la turbina eólica?
- ¿Cómo estimar el costo de implementación de la turbina eólica?

1.7 Objetivos de la Investigación

1.7.1 *Objetivo General*

Desarrollar el análisis experimental de un diseño de turbina eólica mediante el uso de un túnel de viento para validar su eficiencia aerodinámica.

1.7.2 *Objetivos Específicos*

- Evaluar y determinar los parámetros de diseño aerodinámicos de la turbina eólica.
- Aplicar el diseño aerodinámico y un modelo matemático al rotor de la turbina eólica.
- Aplicar el diseño mecánico y fabricar los elementos que constituyen la turbina eólica.
- Analizar experimentalmente el comportamiento de la turbina eólica en un túnel de viento.
- Desarrollar la evaluación económica de la turbina eólica.

1.8 Justificación

- El desarrollo y optimización de turbinas eólicas es un área clave dentro de la ingeniería energética, ya que la eficiencia en la conversión de la energía del viento en electricidad depende en gran medida de su diseño aerodinámico. A pesar de los avances en modelado computacional y simulaciones numéricas, los estudios experimentales siguen siendo fundamentales para validar los modelos teóricos y mejorar el desempeño de las turbinas en condiciones reales.
- El uso de túneles de viento como herramienta de análisis experimental permite evaluar de manera controlada el comportamiento aerodinámico de las turbinas, proporcionando datos precisos sobre el flujo de aire, la distribución de presiones y las fuerzas aerodinámicas que afectan su rendimiento. Sin embargo, la escasez de estudios experimentales detallados limita la optimización de estos sistemas, afectando su eficiencia y viabilidad en distintas condiciones climáticas y geográficas.
- Desde un punto de vista científico y tecnológico, esta investigación contribuirá al desarrollo de metodologías experimentales que permitan mejorar el diseño de turbinas eólicas, optimizando la geometría de las aspas y otros componentes estructurales para maximizar la eficiencia aerodinámica y energética.
- Los datos obtenidos en la presente investigación serán de utilidad para investigaciones futuras de viabilidad y la posterior implementación de turbinas eólicas a una escala geométrica mayor.

1.9 Hipótesis de Investigación

1.9.1 Hipótesis General

El análisis experimental del diseño de una turbina eólica mediante el uso de un túnel de viento permitirá obtener una geometría, un coeficiente de potencia y par óptimo bajo la condición de presión y vientos de la región. Asimismo, con el análisis experimental validaremos su funcionalidad.

1.9.2 Variables de Investigación

<i>Variables independientes</i>	<i>Variables dependientes</i>
➤ Potencial eólico	➤ Coeficiente de potencia.
➤ Radio del rotor	➤ Potencia de la turbina.
➤ Altura del rotor	➤ Velocidad de rotación
➤ Longitud de cuerda	➤ Esfuerzos de diseño
➤ Angulo helicoidal.	
➤ Propiedades del material.	
➤ Costo de fabricación e instalación.	

1.9.3 Operacionalización de Variables.

VARIABLE	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSION	INDICADORES	ESCALA
Variable independiente Potencial eólico	Se define operacionalmente como la energía que tiene las corrientes de aire.	Velocidad de la corriente de aire	Velocidad	m/s
		Presión absoluta del aire.	Presión	mBar
		Densidad de potencia eólica.	Potencia por unidad de área	W/m ²
Variable independiente Radio del rotor	Se define como la distancia de la pala al eje de rotación dirección del eje de rotación del rotor el cual determina la potencia de la turbina eólica.	Radio de la turbina eólica	Radio	m
Variable independiente Altura del rotor	Se define como la distancia de la pala en dirección del eje de rotación del rotor el cual determina la potencia de la turbina eólica.	Altura de la turbina	Altura	m
Variable independiente Longitud de cuerda	Se define como la longitud de la sección transversal del perfil alar el cual determina la solidez del rotor y potencia de la turbina eólica.	Cuerda del perfil alar	Longitud	m
Variable independiente Angulo Helicoidal	Se define como el ángulo de hélice de la pala de la turbina eólica	Inclinación de palas	ángulo	grados sexagesimales
Variable dependiente coeficiente de potencia	Indicador de la capacidad de un sistema para utilizar la fracción de la energía suministrada	Relación de potencia extraída y la potencia disponible del viento	Eficiencia aerodinámica	numérica
Variable dependiente Potencia de la turbina	Se define operacionalmente como la energía mecánica aprovechada del viento	El producto del torque dinámico con las RPM	Potencia	W
Variable dependiente Velocidad de rotación	Se define operacionalmente como el número de vueltas que realiza el rotor o eje	Movimiento rotacional del rotor	Revoluciones por minuto del rotor/eje	RPM

1.10 Metodología de Investigación

1.10.1 Tipo de Investigación

El tipo de investigación es aplicada, tecnológica y experimental, debido a que utiliza fundamentos de aerodinámica, diseño mecánico, manufactura de prototipos y medición instrumental para resolver un problema técnico concreto: validar el desempeño de una turbina eólica en condiciones controladas de túnel de viento.

1.10.2 Enfoque de Investigación

El presente trabajo de investigación tiene un enfoque cuantitativo ya que se hará uso de métodos y técnicas para obtener resultados numéricos.

1.10.3 Nivel de Investigación

El nivel de investigación es descriptivo-correlacional, con componente explicativo. Es descriptivo porque caracteriza el comportamiento del prototipo mediante variables medibles como velocidad del viento, velocidad angular, torque, potencia mecánica, coeficiente de potencia y relación de velocidad punta. Es correlacional porque analiza la relación entre las condiciones de ensayo, principalmente la velocidad del viento, y la respuesta aerodinámica del rotor. Además, incorpora un componente explicativo al contrastar los resultados experimentales con el modelo aerodinámico DMST y con los criterios de diseño mecánico del prototipo.

1.10.4 Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación corresponde a un diseño experimental de laboratorio, de enfoque cuantitativo y con validación teórico-experimental. Se considera experimental porque el investigador controla las condiciones de operación del prototipo en el túnel de viento, principalmente la velocidad del flujo de aire, y registra la respuesta mecánica y aerodinámica de la turbina. Al desarrollarse en un ambiente controlado, el ensayo permite repetir mediciones,

reducir perturbaciones externas y comparar los resultados experimentales con el modelo matemático empleado.

El desarrollo metodológico se organiza en cuatro fases principales. La primera comprende la definición de las condiciones de operación y de los parámetros geométricos del rotor, considerando el área del túnel de viento, el efecto de bloqueo, la relación altura-diámetro, el número de palas, la cuerda, el perfil NACA 0015 y el ángulo helicoidal. La segunda fase corresponde al diseño aerodinámico mediante el modelo Double Multiple Streamtube (DMST), con el cual se estiman el coeficiente de potencia. La tercera fase incluye el diseño mecánico, selección de materiales, verificación estructural y fabricación del prototipo. La cuarta fase comprende el ensayo experimental, el procesamiento estadístico de datos y la comparación teórico-experimental.

La unidad de análisis es el prototipo de turbina eólica diseñado para la cámara de pruebas del túnel de viento. En la etapa de diseño se evalúan configuraciones de cuerda de 0.03 m y 0.04 m, manteniendo constantes el diámetro, la altura, el número de palas, el perfil NACA 0015 y el ángulo helicoidal de 60° . En la etapa experimental se ensaya la configuración fabricada con cuerda de 0.04 m, seleccionada para validar el comportamiento del rotor bajo condiciones de baja velocidad de viento.

El factor experimental principal es la velocidad del viento, establecida en cuatro niveles: 3 m/s, 4 m/s, 5 m/s y 6m/s. Para cada nivel se realizan diez repeticiones, con el fin de obtener valores medios, desviaciones estándar, mínimos y máximos, así como evaluar la repetibilidad de las mediciones. Las variables dependientes son la velocidad angular del rotor, el torque dinámico, la potencia mecánica, el coeficiente de potencia C_p y la relación de velocidad punta TSR. Las variables controladas corresponden a la geometría del rotor, posición de montaje,

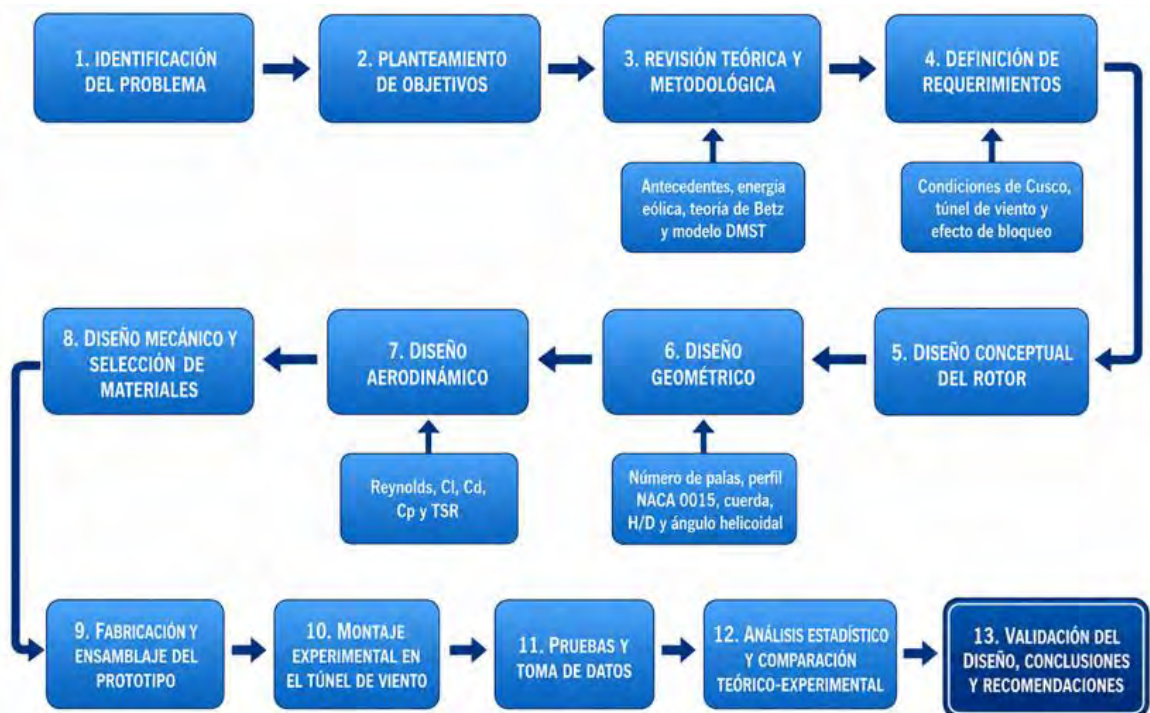
sistema de medición, densidad del aire, procedimiento de arranque, tiempo de estabilización y método de medición mediante tacómetro, anemómetro, sensor de tensión y freno Prony.

El criterio de validación consiste en comprobar que el prototipo gire de manera estable, que las mediciones sean repetibles y que la tendencia experimental de C_p y TSR sea coherente con el comportamiento previsto por el modelo aerodinámico. La comparación teórico-experimental permite validar la funcionalidad del diseño, identificar tendencias de desempeño y cuantificar las diferencias entre el comportamiento calculado y el medido, considerando las pérdidas mecánicas y limitaciones propias del ensayo a escala reducida.

La siguiente imagen muestra el flujo de actividades a desarrollar durante la presente investigación.

Figura 2.

Flujograma de actividades de la presente investigación.



Nota: Fuente propia.

1.10.5 Población y Muestra

La población conceptual está constituida por los diseños de turbinas eólicas de eje vertical tipo Darrieus helicoidal aplicables a ensayos de laboratorio y a condiciones de baja velocidad de viento. La muestra es de tipo intencional y no probabilística, conformada por el prototipo diseñado y fabricado para la presente tesis. En la fase de diseño aerodinámico se comparan dos configuraciones de cuerda de pala, 0.03 m y 0.04 m; mientras que en la fase experimental se evalúa la configuración fabricada de cuerda 0.04 m a cuatro niveles de velocidad del viento, 3 m/s, 4 m/s, 5 m/s y 6m/s, con diez repeticiones por cada condición de ensayo.

1.10.6 Técnicas de Recolección de Datos

La técnica de recolección de datos es experimental e instrumental. Consiste en observar directamente el funcionamiento del prototipo dentro del túnel de viento y registrar, para cada condición de ensayo, las magnitudes necesarias para evaluar su desempeño aerodinámico y mecánico.

Los instrumentos utilizados son: anemómetro para medir la velocidad del flujo de aire, tacómetro digital para medir la velocidad angular del rotor, sensor de tensión asociado al freno Prony para estimar la fuerza de frenado. Con estos datos se determinan el torque dinámico, la potencia mecánica, el coeficiente de potencia y la relación de velocidad punta.

1.10.7 Procesamiento de Datos

El procesamiento de datos se realiza mediante una matriz experimental organizada por velocidad del viento, número de repetición, velocidad angular, masa de levante, torque, potencia mecánica, potencia disponible del viento, coeficiente de potencia y TSR. Primero se convierten las mediciones directas a unidades del Sistema Internacional; luego se calculan las variables derivadas mediante las ecuaciones correspondientes; finalmente se obtienen indicadores

estadísticos y se comparan los resultados experimentales con los valores teóricos obtenidos mediante el modelo DMST.

1.10.8 Técnicas de Análisis de Datos

El análisis de datos se desarrolla mediante estadística descriptiva, comparación teórico-experimental y prueba estadística de hipótesis. Para cada velocidad de viento se calculan la media, desviación estándar, mínimo, máximo y variación relativa de las principales variables de respuesta.

La comparación teórico-experimental se realiza mediante las curvas C_p -TSR y mediante el error relativo entre los valores calculados y medidos. Esta comparación permite identificar la influencia de la escala reducida, la fricción mecánica, la rugosidad superficial y las limitaciones de medición sobre el rendimiento real del prototipo.

La prueba de hipótesis se realiza mediante ANOVA cuando se requiere determinar si la variación de la velocidad del viento produce diferencias estadísticamente significativas en las variables de respuesta. Para ello se consideran como tratamientos los niveles de velocidad de 3 m/s, 4 m/s, 5 m/s y 6m/s, y como repeticiones las mediciones realizadas en cada condición de ensayo.

1.10.9 Alcances y limitaciones

1.10.9.1 Alcances

- Desarrollar el diseño y fabricación de la turbina eólica para poder realizar las pruebas experimentales en un túnel de viento y analizar su eficiencia aerodinámica.
- Plantear una solución para el aprovechamiento energético del viento con bajas velocidades y cambios de dirección presentes en la región.
- Comprender y analizar el comportamiento al interactuar fluido-alabe en una turbina eólica y así plantear soluciones similares a estudios posteriores.
- Validar el diseño teórico de la turbina eólica mediante pruebas experimentales en un túnel de viento.

1.10.9.2 Limitaciones

- El diseño y análisis experimental se desarrollarán tomando datos de presión atmosférica y rangos de velocidad de viento presentes en la región Cusco.
- El diseño mecánico de la instrumentación usada para el desarrollo de pruebas experimentales no será presentado en la presente investigación.
- La presente investigación no contempla la aplicación de un sistema de automatización para las pruebas experimentales.
- El alcance de la investigación estuvo enfocado en la evaluación del rendimiento aerodinámico de la turbina eólica, considerando parámetros como el coeficiente de potencia (C_p), el torque y la relación de velocidad de punta (TSR). No se incluyeron estudios de vibraciones ni análisis modal de la estructura, por lo que aspectos relacionados con resonancia, comportamiento dinámico y fatiga estructural no fueron abordados en el presente trabajo.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes Nacionales

Hernández Bravo, (2016) En su tesis titulada: ***“DISEÑO DE AEROGENERADOR VERTICAL MODELO DARRIEUS PARA ENSAYOS EN EL TUNEL DE VIENTO DEL LABORATORIO DE INGENIERÍA DE LA PUCP” Lima- Perú.*** Diseña un aerogenerador vertical modelo Darrieus como una alternativa adicional a los aerogeneradores horizontales convencionales, el cual empleo posteriormente para realizar ensayos en el túnel de viento con la finalidad de estudiar sus posibilidades técnicas para generar electricidad.

La metodología empleada en la presente investigación fue experimental con un enfoque cuantitativo. Como resultado de su estudio concluye lo siguiente.

Se creó el modelo geométrico del aerogenerador, para ello se seleccionó el perfil aerodinámico NACA 0018 como sección transversal de la pala y los tres radios del rotor (0,132, 0,165 y 0,20 m). Además, se simuló en ANSYS la velocidad del flujo de aire de 10 m/s a la salida del túnel de viento y se comprobó que, a una distancia de 20 cm, la velocidad del viento permanece constante; es decir, 10 m/s, a excepción de los bordes de la sección donde la velocidad es aproximadamente 7 m/s, por lo que se escogió la sección de ensayos a la salida del túnel de viento. En base a los siguientes parámetros: la sección transversal de la pala, radios del rotor y ubicación del aerogenerador, se realizaron los cálculos aerodinámicos.

La comparación entre el coeficiente de potencia de un rotor de 2 y 3 palas, evaluados a 3 m/s, reveló que el máximo desempeño del rotor se obtiene con la unidad de tres palas. Asimismo, el máximo coeficiente de potencia se obtiene con una longitud de cuerda (c) de 6 cm para una

pala de sección NACA 0018. También se comprobó que cuando la altura (H) y el diámetro (D) del rotor son de igual longitud, es decir 330 mm, se obtiene un mayor coeficiente de potencia. Los tres análisis mencionados se calcularon con los mismos parámetros de entrada (D= 330 mm, H= 330 mm, c= 60 mm y $Re = 1,6 \times 10^5$) donde el coeficiente de potencia resultó ser 0,3619 para todos los casos.

(Caballero Gamarra et al. (2021) En su tesis ***“AEROGENERADOR HIBRIDO DE EJE VERTICAL PARA ABASTECER DE ENERGIA ELÉCTRICA AL LABORATORIO GENERAL DE BIOTECNOLOGIA DE LA UNPRG”*** Lambayeque-Perú. Tuvo como objetivo diseñar un prototipo de aerogenerador desarrollando un estudio del potencial eólico de la zona, la simulación del prototipo en el software y la simulación del sistema híbrido que incluye paneles solares.

El presente trabajo desarrolla una metodología de tipo aplicada de aspecto descriptivo-explicativo y variables cuantitativas. Como resultado de sus estudios concluyen lo siguiente:

La demanda de energía del laboratorio de Biotecnología es de 4874.8 kWh/año, con una potencia instalada de 5.12 kW y una potencia máxima instantánea de 3.33 kW. El día con mayor consumo de energía es el jueves, por el uso de los hornos y microondas del laboratorio.

Se seleccionó un aerogenerador VAWT de tipo DARRIEUS helicoidal por su mayor rendimiento en comparación con las otras tecnologías y por la forma de sus álabes que garantiza una zona de ataque.

las dimensiones adecuadas del aerogenerador son de 1.6 m para el diámetro del rotor con una altura de 1.8 metros, para la cuerda que une el rotor con los álabes tiene una dimensión de 0.4 metros. El número de palas es de tres.

Vásquez Meza, (2023) En su tesis titulada: ***“Estudio del aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus helicoidal en la ciudad universitaria de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos” Lima-Perú.*** Investiga tiene como objetivo evaluar el rendimiento de un aerogenerador Darrieus de rotor H variando la forma del perfil aerodinámico, evalúa la influencia de la velocidad del viento en la eficiencia de un aerogenerador.

La metodología del presente trabajo desarrolla una investigación no experimental con un enfoque cuantitativo y un nivel aplicado tecnológico. Como resultado concluye lo siguiente.

Los parámetros que caracterizan el viento, como la velocidad, temperatura y densidad, permitieron que la ubicación de este recinto sea apropiada para considerar la instalación del aerogenerador. La densidad del potencial eólico influyó en la eficiencia del aerogenerador ya que se calculó dentro de la Ciudad Universitaria en el Punto 9 un total de 20.174 W/m^2 de densidad de potencial eólico a una velocidad promedio de 3.493 m/s , siendo una capacidad lo suficientemente considerable para la producción eléctrica de un aerogenerador de eje vertical.

Se corroboró que la potencia de 11.97W obtenidos a partir de la simulación CFD del diseño del rotor en el software Qblade fue cercano a lo medido en campo que resultó en 11.15W , con un margen de error de 7.34% , concluyendo que la velocidad influyó directamente sobre la eficiencia del aerogenerador diseñado.

2.2 Antecedentes Internacionales

Mendoza Cerón, (2017) En su tesis titulada: ***“DISEÑO DE UN GENERADOR ÉOLICO DE EJE VERTICAL TIPO DARRIEUS HELICOIDAL DE 3 KW”***, desarrolla el procedimiento de diseño y fabricación de un aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus helicoidal específicamente para la zona de Pachúa.

El trabajo desarrolla una investigación no experimental con un enfoque cuantitativo y un nivel aplicado y concluye lo siguiente:

Fue posible observar que el generador tiene un óptimo autoarranque y puede aumentar su velocidad de giro sin hacer cambios bruscos, presenta poca oscilación a comparación del rotor de palas rectas. Este proyecto está abierto a varias mejoras como la implementación del sistema de generación, ya que solo se centró en el diseño del rotor.

Mohamed, (2012) En su artículo científico titulado: ***“Performance investigation of H-rotor Darrieus turbine with new airfoil shapes”*** realizo la investigación de los componentes principales de los modelos teóricos habituales utilizados para la predicción del rendimiento de los VAWT tipo Darrieus.

La investigación es no experimental con un enfoque cuantitativo y de tipo aplicado.

Con el procedimiento CFD actual es capaz de obtener un perfil aerodinámico considerablemente mejor que la turbina Darrieus convencional, lo que lleva en particular a un aumento relativo del coeficiente de potencia de salida en un 26.83% correspondiente al perfil aerodinámico S-1046 en comparación con los perfiles simétricos estándar NACA. Asimismo, se amplía el rango operativo al usar una solidez baja.

Lee & Lim, (2015) En su artículo científico titulado: ***“Numerical study of the aerodynamic performance of a 500W Darrieus-type vertical-axis wind turbine”*** Corea del Sur. En su estudio caracteriza el rendimiento de una turbina eólica de eje vertical (VAWT) tipo Darrieus con palas de perfil aerodinámico (NACA). Asimismo, examinan las características aerodinámicas y el flujo separado que ocurre en las proximidades de la pala, la interacción entre el flujo y la pala, y las características de par y potencia. derivados de estas características. En el

análisis de flujo, las variaciones de flujo se investigaron basándose en el modelo inestable de Navier-Stokes promediado por Reynolds.

La investigación se desarrolló aplicando un diseño experimental y tipo tecnológico en la cual llegaron a las siguientes conclusiones:

A medida que aumenta la solidez, el coeficiente de potencia aumenta en un rango de TSR bajo. Sin embargo, en un rango de TSR alto, a medida que aumenta la velocidad de rotación, la fuerza de arrastre también aumenta. Por lo tanto, un modelo con alta solidez produce un coeficiente de potencia bajo porque se ve afectado por una fuerza de arrastre más fuerte.

La relación de espesor del perfil aerodinámico no supone una diferencia significativa en el rendimiento del rotor eólico. Sin embargo, al igual que la solidez, un perfil aerodinámico grueso se aplica mediante una mayor fuerza de arrastre, lo que conduce a un bajo coeficiente de potencia. Por tanto, NACA0015 muestra el mejor rendimiento en un rango alto de TSR.

Herrera Arbeláez, (2019) En su tesis titulada: ***“ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO HIDRODINÁMICO DE UNA TURBINA DARRIEUS TIPO HELICOIDAL”*** Bogotá-Colombia. Realiza el estudio del desempeño hidrodinámico de una turbina Darrieus tipo helicoidal por medio de la dinámica de fluidos computacional en la cual desarrolla una geometría simplificada de un perfil NACA la cual hace la simulación computacional y finalmente realiza las comparaciones de los campos de velocidades, presiones, vorticidad, torque generado entre una turbina Darrieus tipo helicoidal y una Darrieus tipo H con las mismas dimensiones de diámetro, altura y cuerda.

La investigación se desarrolló aplicando un diseño no experimental y tipo tecnológico aplicado en la cual llegaron a las siguientes conclusiones:

La configuración helicoidal en las aspas reduce de forma significativa el torque sobre estas, debido a la disminución del área de incidencia sobre el flujo que recibe el torque de forma directa, sin embargo, esto también reduce el tamaño de las oscilaciones de torque, lo cual puede ayudar a bajar vibraciones en el eje del rotor,

La eficiencia se ve afectada de forma directa al cambiar la configuración de las aspas, esta se reduce casi en la tercera parte cuando se compara con la turbina de aspas rectas en el mismo punto de operación.

La curva de potencia mantiene un comportamiento similar independientemente de sus magnitudes para las respectivas turbinas y el punto de mejor operación es el mismo para ambas turbinas.

Rodríguez Díaz et al, (2021) En su revista de investigación titulada: ***“Desarrollo de modelo de rotor Darrieus para banco eólico de eje vertical” Tunja-Colombia.*** Realizó un estudio aplicando el teorema de Buckingham con modelos en tunces de viento con lo cual se logra replicar y reducir prototipos en modelos de laboratorio para realizar mediciones de valores geométricos, dinámicos y cinemáticos. Asimismo, en su estudio presenta el desarrollo matemático y mecánico de un rotor Darrieus H para un banco eólico de eje vertical.

La investigación se desarrolló aplicando un diseño experimental y tipo tecnológico en la cual llegaron a las siguientes conclusiones:

El uso de las herramientas matemáticas facilita el estudio de diferentes fenómenos físicos presentes en la vida cotidiana y también en problemas de alta ingeniería. Esto representa un gran ahorro de recursos a la hora de realizar mediciones y pruebas con modelos de equipos máquinas

ya existentes o en un caso más avanzado en el desarrollo de nuevas tecnologías y máquinas sin tener que construir grandes y dispendiosos prototipos que tendrán un solo uso.

2.3 Fundamentos teóricos

2.3.1 Turbinas Eólicas

(Rojas Cepeda, 2019) Las turbinas eólicas son maquinas hidráulicas que transforman la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación mediante el intercambio de cantidad de movimiento. La energía mecánica generada en su eje puede ser utilizado para diversas aplicaciones.

2.3.2 Turbinas Eólicas de Eje Horizontal

(Gonzáles & Rodríguez, 2015) Estas turbinas tienen el eje de rotación paralelo al suelo y son los más utilizados en la actualidad. Ofrecen mayor eficiencia energética, alcanzan altas velocidades de rotación y se adaptan a distintas potencias. Su montaje en torres elevadas optimiza el aprovechamiento del perfil de velocidades del viento.

2.3.2.1 Tipos de Turbinas Eólicas de Eje Horizontal

2.3.2.1.1 Turbina Eólica Monopala.

(Gonzáles & Rodríguez, 2015) Las turbinas monopala presentan una desventaja: requieren un contrapeso en el extremo opuesto del ala para mantener el equilibrio, lo que reduce el ahorro en peso y puede afectar la eficiencia estructural y aerodinámica del sistema. La figura 3 muestra una turbina tipo monopala.

Figura 3.

Turbina eólica monopala o pendular.



Nota: Tomado de Energética Futura (2009)

2.3.2.1.2 Turbina eólica bipala

(EduRED, 2014) Reducen peso y costo al eliminar una pala respecto a las turbinas tripala, pero requieren mayor velocidad de giro para igualar su energía. Para evitar inestabilidad, necesitan un diseño complejo con rotor basculante y amortiguadores que previenen impactos con la torre.

Figura 4.

Turbina eólica bipala.



Nota: Tomado de Amagazings Divulgación S.L. (2010)

2.3.2.1.3 Turbina Eólica Tripala

(EduRED, 2014) Es el diseño más usado hoy en día, con tres palas separadas 120° . Más palas aumentan peso y costo, por lo que no se usan comercialmente para generar energía, aunque sí en aplicaciones mecánicas como el bombeo de agua.

Figura 5.

Turbina eólica tripala.



Nota: Tomado de Nuria (2024)

2.3.3 Turbinas Eólicas de Eje Vertical

(Vásquez Meza, 2023) Los aerogeneradores de eje vertical tienen el rotor perpendicular al viento, diferenciándose de los de eje horizontal. Su funcionamiento depende del arrastre o la sustentación, según el diseño del rotor.

2.3.3.1 Turbinas Eólicas Basadas en el Principio de Sustentación

2.3.3.1.1 Turbina Eólica Rotor Darrieus H (Giromil).

(Alave Vargas et al., 2022) Este aerogenerador sustituye las palas por perfiles aerodinámicos rectos de diversas geometrías, optimizando la sustentación con un ángulo de ataque fijo. Las configuraciones más comunes usan tres palas, con ángulos de ataque fijos o variables.

Figura 6.

Turbina eólica Darrieus de tipo Giromill.



Nota: Tomado de “Harvesting wind power from tall buildings.” Denoon et al., (2008)

2.3.3.1.2 Turbina Eólica ϕ -Darrieus (crossflex).

(Alave Vargas et al., 2022) Consta de palas aerodinámicas curvadas en un eje giratorio. Su funcionamiento se basa en la sustentación: el flujo de viento sobre las palas genera una fuerza en la dirección de avance, produciendo un par positivo en el rotor. (Sharpe & Proven, 2010) Diseñaron un rotor Darrieus alargado con aspas helicoidales unidas mecánicamente o por soldadura. Su eficiencia mejora respecto al diseño tradicional debido a su menor masa inercial, facilitando el giro.

Figura 7.

Turbina eólica Crossflex.



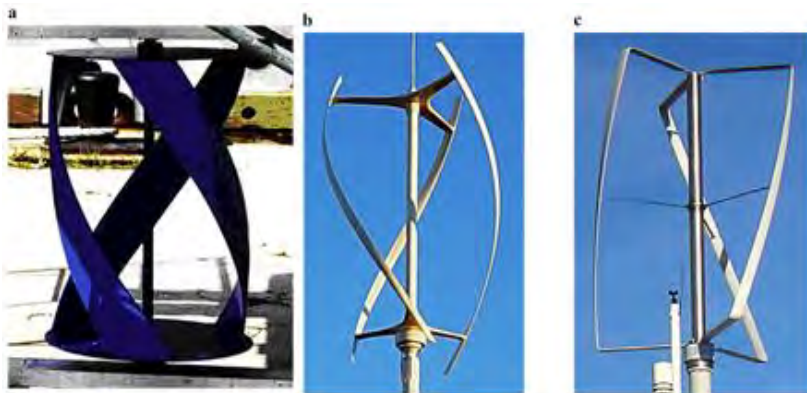
Nota: Tomado de “Crossflex: Concept and early development of a true building integrated wind turbine” Sharpe & Proven, (2010).

2.3.3.1.3 Turbina Eólica Helicoidal H.

(Sharpe & Proven, 2010) El rotor H fue modificado con palas helicoidales, ideado inicialmente como turbina de agua por el profesor A.M. Gorlov. Aunque diseñado para agua, las patentes sugieren su uso en energía hidroneumática, hidroeléctrica, eólica y undimotriz.

Figura 8.

Rotor H helicoidal: (a) turbina de agua Gorlov, (b) y (c) turbina eólica Quiet Revolution.



Nota: Tomado de “Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations” Tjiu et al., (2015).

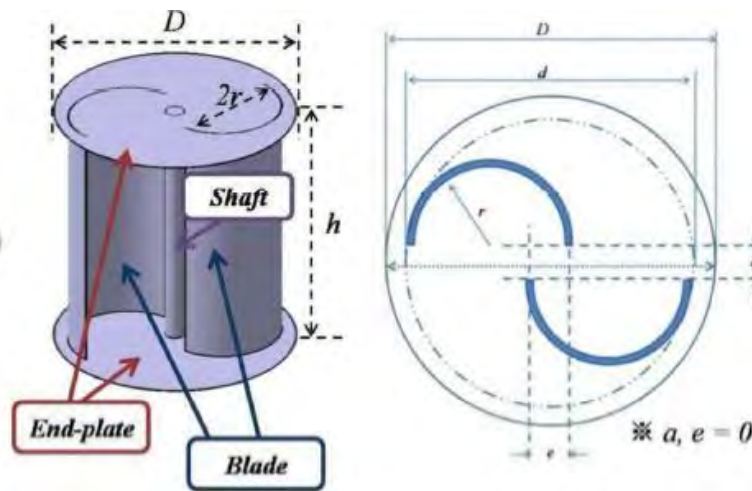
2.3.4 Turbinas Eólicas Basadas en el Principio de Arrastre

2.3.4.1 Turbina Eólica Savonius.

(Alave Vargas et al., 2022) Las turbinas Savonius ofrecen mayor adaptabilidad a distintos fluidos y flujos en comparación con las Darrieus y otras basadas en sustentación. Sin embargo, su eficiencia es menor debido a la pérdida de energía al impactar las palas, aunque pueden autoiniciarse incluso a bajas velocidades.

Figura 9.

Turbina eólica Savonius tradicional.



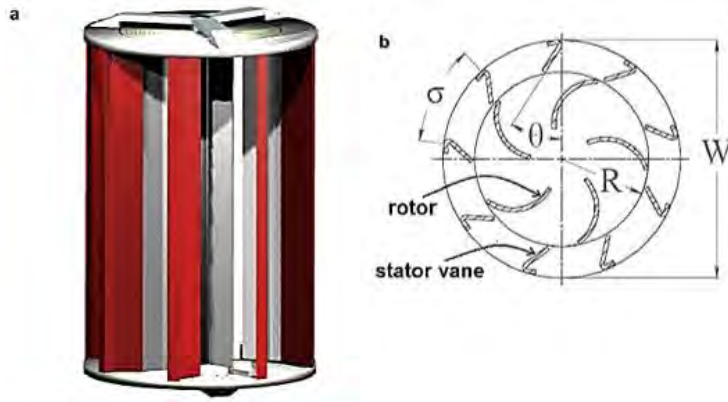
Nota: Tomado de “Numerical analysis on the low noise designs of savonius wind turbines by inducing phase difference in vortex shedding” Kim & Cheong, (2014).

2.3.4.2 Turbina Eólica Zephyr.

(Pope et al., 2010) La turbina Zephyr opera por arrastre, con álabes en el estator que controlan el flujo de viento, reduciendo turbulencia y mejorando su concentración sobre las palas. El máximo coeficiente de potencia alcanzado es de 0,12.

Figura 10.

Prototipo de turbina eólica de eje vertical Zephyr: (a) ilustración y (b) geométrica variables



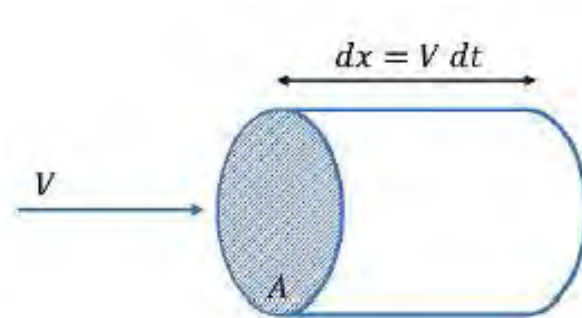
Nota: Tomado de “Effects of stator vanes on power coefficients of a zephyr vertical axis wind turbine” Pope et al., (2010).

2.3.5 Energía Eólica

(Pramod, 2011) El movimiento del aire, influenciado por diversos factores, posee energía cinética debido a su velocidad. Para cuantificarla, se define un volumen de control, en este caso, un cilindro inclinado (Figura 2) con sección transversal A , por donde circula una masa de aire ma de densidad ρ en un tiempo diferencial dt .

Figura 11.

Flujo a través de un disco.



Nota: Adaptado del Atlas Eólico del Perú. (p.32) Ministerio de Energía y minas, 2016

2.3.5.1 Clasificación de la Velocidad del Viento

Tabla 1: Rango de velocidades de viento y densidad de potencia.

Clase de viento	Nombre de clase de viento	10m		50m	
		Densidad de potencia, W/m ²	Velocidad del viento, m/s	Densidad de potencia, W/m ²	Velocidad del viento, m/s
1	pobre	0 - 100	0 - 4.4	0 - 200	0 - 5.6
2	marginal	100 - 150	4.4 - 5.1	200 - 300	5.6 - 6.4
3	justo	150 - 200	5.1 - 5.6	300 - 400	6.4 - 7.0
4	bueno	200 - 250	5.6 - 6.0	400 - 500	7.0 - 7.5
5	Excelente	250 - 300	6.0 - 6.4	500 - 600	7.5 - 8.0
6	pendiente	300 - 400	6.4 - 7.0	600 - 800	8.0 - 8.8
7	magnifico	400 - 1000	7.0 - 9.4	800 - 2000	8.8 - 11.9

Nota: Adaptado de Wind Energy Engineering. (p.33) Pramod, 2011

2.3.5.2 Densidad de Potencia

La densidad de potencia eólica es una medida de la cantidad de energía que el viento puede proporcionar por unidad de área perpendicular a la dirección del viento

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \dots (W)$$

2.3.5.3 Densidad del Aire en Función de la Elevación

(Pramod, 2011) “La densidad del aire depende de la presión, la temperatura y la humedad relativa. A medida que aumenta la elevación, tanto la presión como la temperatura disminuyen.

$$\rho = \frac{p}{RT}$$

$$\rho = \frac{p}{RT} \frac{M}{1000}$$

Donde:

M: peso molecular del aire 28.9644 g/mol.

R: constante de los gases ideales cuyo valor es 8.31432 J/mol*k.

ρ : Densidad del aire kg/m³.

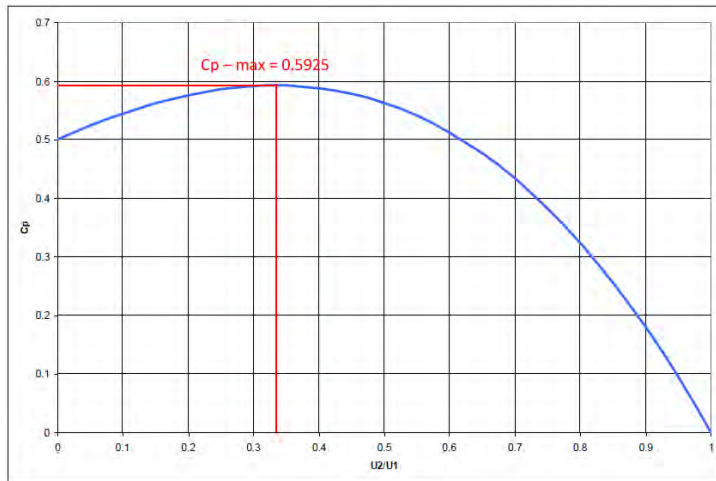
p: presión en pascales.

2.3.6 Teoría del Impulso de Betz

Ministerio de energía y minas, (2016) El coeficiente de potencia máximo, conocido como Límite de Betz, representa el tope de eficiencia de una turbina eólica al convertir energía cinética del viento. Este valor varía según la forma y tipo de aerogenerador. La Figura 12 muestra C_p en función del cociente de velocidad U_2/U_1 , alcanzando un máximo de 16/27 (≈ 0.59).

Figura 12.

Valor de C_p en función del cociente U_2/U_1 .



Nota: Tomado del Atlas Eólico del Perú. (p.34) Ministerio de Energía y minas, 2016

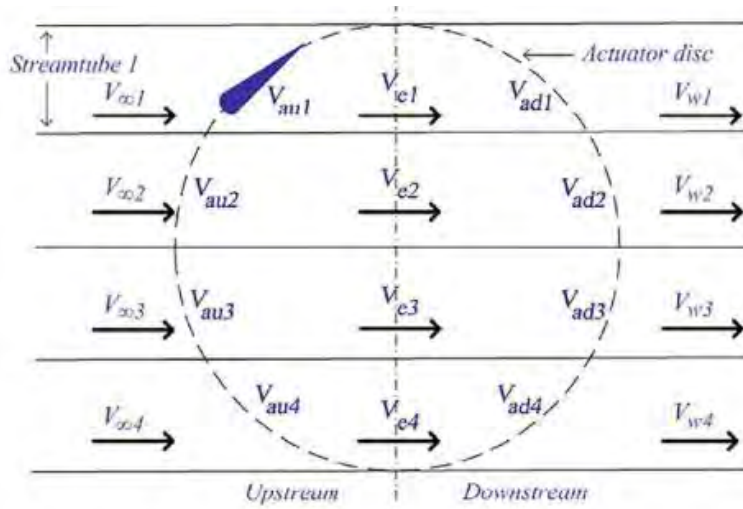
2.3.7 Modelo Matemático Del Rotor

2.3.7.1 Modelo del Doble Disco Actuador de Múltiples Tubos de Corriente

Considera un disco actuador aguas arriba y el segundo aguas abajo del rotor, lo cual permite una mejor representación de la distribución de la velocidad y la presión en el rotor.

Figura 13.

Esquema modelo del doble disco actuador de múltiples tubos de corriente.



Nota: Tomado de Investigation of Effective Parameters on Gorlov Vertical Axis Wind Turbine [Fotografía], por Moghimi & Motawej, 2020.

2.3.7.2 Viscosidad Cinemática.

La viscosidad cinemática es una propiedad que se obtiene al dividir la viscosidad dinámica de un fluido por su densidad, lo que indica la facilidad con la que el fluido puede fluir bajo la influencia de la gravedad (Mott et al., 2015).

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{\eta_0 * \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2}}{\rho}$$

Donde:

ν : Viscosidad cinemática.

η : viscosidad dinámica.

η_0 : viscosidad dinámica del aire en condiciones normales 1.716×10^{-5} (Pa.s).

ρ : Densidad del aire.

T : Temperatura del aire.

T_0 : Temperatura del aire en condiciones normales 273.15 (K).

2.3.7.3 Numero de Tubos de Corriente Verticales (N_v) y Horizontales (N_h).

De acuerdo con el modelo matemático DMST aplicado a palas curvas, la cantidad de divisiones en el plano horizontal y vertical se expresa de la siguiente manera:

$$N_h = \frac{180^\circ}{\Delta\theta}$$

Donde:

N_h : Numero de tubos de corriente horizontales.

$\Delta\theta$: Variación del ángulo azimutal.

$$N_v = \frac{\psi}{\Delta\theta}$$

Donde:

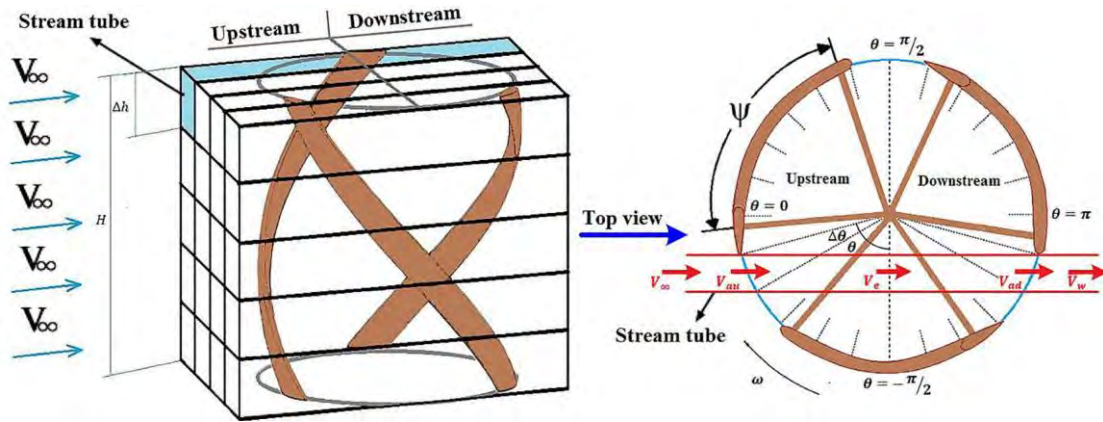
N_h : Numero de tubos de corriente verticales.

ψ : Ángulo helicoidal de la pala.

La figura 13, muestra un esquema 3d de discretización de la turbina.

Figura 14.

Tubos de corriente horizontal y vertical.



Nota: Tomado de “Developed DMST model for performance analysis and parametric evaluation of Gorlov vertical axis wind turbines” Moghimi & Motawej, (2020).

2.3.7.4 Velocidad del Flujo libre (v_{∞})

Es la velocidad del aire que se desplaza en la dirección axial del tubo de corriente mostrado en el grafico que representa el modelo matemático DMST.

2.3.7.5 Velocidad Inducida Aguas Arriba (v_{au})

Es la velocidad multiplicado por un factor de interferencia que se da cuando el aire ingresa en la primera mitad del disco actuador, el cual está representado por la siguiente formula:

$$v_{au} = au * v_{\infty}$$

2.3.7.6 Velocidad de Equilibrio (v_e)

Es la velocidad del fluido cuando este atraviesa la recta que divide el disco actuador corriente aguas arriba y corriente aguas abajo, el cual está representado por la siguiente formula:

$$v_e = (2au - 1) * v_{\infty}$$

2.3.7.7 Velocidad Inducida Aguas Arriba (v_{ad})

Es la velocidad multiplicado por un factor de interferencia que se da cuando el aire ingresa a la segunda mitad del disco actuador, el cual está representado por la siguiente formula:

$$v_{ad} = ad(2au - 1) * v_{\infty}$$

2.3.7.8 Velocidad Relativa Local Aguas Arriba (w_{up})

Es la velocidad relativa local que está en función del ángulo de ataque aguas arriba del disco actuador, el cual está representado por la siguiente formula:

$$W_{up} = V_{\infty} * \sqrt{(\lambda_0 + au \sin(\theta))^2 + (au \cos(\theta))^2}$$

2.3.7.9 Angulo de Ataque Aguas Arriba (α_{up})

Es el ángulo de ataque aguas arriba del del disco actuador, el cual es denotado por la siguiente formula:

$$\alpha_{up} = \tan^{-1} \left(\frac{au \cos(\theta)}{\lambda_0 + au \sin(\theta)} \right)$$

2.3.7.10 Relación de Velocidad Punta Local Aguas Arriba (λ_0)

Es la relación de velocidad punta local que relaciona la velocidad tangencial del rotor con la velocidad inducida aguas arriba del del disco actuador, el cual está representado por la siguiente formula:

$$\lambda_0 = \frac{\omega * R}{V_{au}}$$

2.3.7.11 Coeficiente Normal y Tangencial Aguas Arriba (C_N), (C_T)

Son valores adimensionales cuyos valores están en función del ángulo de ataque y los coeficientes de sustentación, coeficiente de arrastre que son valores propiamente del perfil alar, el cual está representado por la siguiente formula:

$$C_N = C_L \cos(\alpha_{up}) + C_D \sin(\alpha_{up})$$

$$C_T = C_L \sin(\alpha_{up}) - C_D \cos(\alpha_{up})$$

2.3.7.12 Numero de Reynolds Local Aguas Arriba (Re_{up})

Es un numero de Reynolds local es esta en función de la velocidad relativa local aguas arriba del disco actuador, cuerda de la hoja y la viscosidad cinemática, el cual está representado por la siguiente formula:

$$Re_{up} = \frac{W_{up} * c}{\nu}$$

2.3.7.13 Factor de Inducción (au)

Al aplicar la teoría del momento de elemento de pala (BEM) para cada tubo de corriente, se resuelve mediante la ecuación siguiente:

$$au = \frac{\pi}{F_{up} + \pi}$$

2.3.7.14 Función del Viento Aguas Arriba (F_{up})

Es la función que caracteriza las condiciones del viento aguas arriba del disco actuador

$$F_{up} = \frac{N * c}{8 * \pi * R} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{W_{up}}{V_{au}} \right)^2 |\sec(\theta)| (C_N \cos(\theta) - C_T \sin(\theta)) d\theta$$

2.3.7.15 Fuerza Normal y Tangencial (F_N), (F_T)

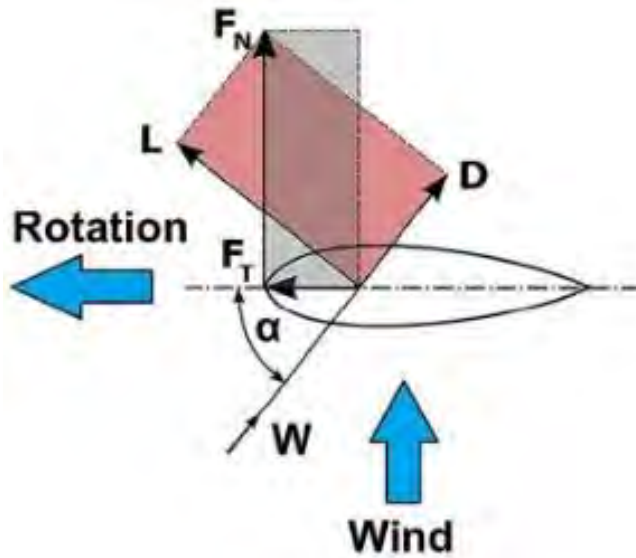
Son las fuerzas que actúan en el perfil aerodinámico y estos a su vez varían en magnitud y dirección según la posición en la que se encuentren y dependen del ángulo azimutal θ , el cual está representado por la siguiente formula:

$$F_N(\theta) = \frac{1}{2} C_N \rho c \Delta h W_{up}^2$$

$$F_T(\theta) = \frac{1}{2} C_T \rho c \Delta h W_{up}^2$$

Figura 15.

Esquema de fuerzas aerodinámicas que actúan sobre el perfil aerodinámico de la pala.



Nota: Tomado de Investigation of Effective Parameters on Gorlov Vertical Axis Wind Turbine [Fotografía], por Moghimi & Motawej, 2020.

2.3.7.16 Torque Instantáneo ($Q(\theta)$):

Es el torque instantáneo en una ubicación azimutal específica el cual se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$Q(\theta) = \frac{1}{2} C_T \rho c R \Delta h W_{up}^2$$

2.3.7.17 Torque Total Promedio Aguas Arriba ($Q_{up(av)}$):

El torque total promedio se calcula mediante la suma del torque producido por cada alabe en cada tubo de corriente:

$$Q_{up_{av}} = \frac{N}{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} Q(\theta) d\theta$$

2.3.7.18 Coeficiente de Torque Medio ($C_{qup(av)}$):

Es el coeficiente de torque medio aguas arriba del disco actuador, el cual se denota por la siguiente ecuación:

$$C_{qup_{av}} = \frac{Q_{up_{av}}}{\frac{1}{2} \rho A R V_{\infty}^2}$$

2.3.7.19 Coeficiente de Potencia Aguas Arriba ($C_{pup(av)}$):

El coeficiente de potencia aguas arriba se puede expresar en términos de relación de velocidad punta de la turbina y coeficiente de par medio:

$$C_{pup} = \lambda * C_{qup_{av}}$$

2.3.7.20 Velocidad Relativa Local Aguas Abajo (w_{dw})

La velocidad relativa local depende del ángulo de ataque aguas abajo del disco actuador y se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$W_{dw} = (2au - 1)V_{\infty} * \sqrt{(\lambda'_0 + ad \sin(\theta))^2 + (ad \cos(\theta))^2}$$

2.3.7.21 Angulo de Ataque Aguas Abajo (α_{dw})

El ángulo de ataque aguas abajo del disco actuador se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$\alpha_{dw} = \tan^{-1} \left(\frac{ad \cos(\theta)}{\frac{\lambda'_0}{2au-1} + ad \sin(\theta)} \right)$$

2.3.7.22 Relación de Velocidad Punta Local Aguas Abajo (λ'_0)

Es la relación de velocidad punta local aguas abajo, que vincula la velocidad tangencial del rotor con la velocidad inducida aguas arriba del disco actuador, representada por la siguiente fórmula:

$$\lambda'_0 = \frac{\omega * R}{V_{ad}}$$

2.3.7.23 Coeficiente Normal y Tangencial Aguas Abajo (C'_N), (C'_T)

Son valores adimensionales dependientes del ángulo de ataque y los coeficientes de sustentación y arrastre del perfil alar en el tramo aguas abajo del rotor, expresados en la siguiente fórmula:

$$C'_N = C_L \cos(\alpha_{dw}) + C_D \sin(\alpha_{dw})$$

$$C'_T = C_L \sin(\alpha_{dw}) - C_D \cos(\alpha_{dw})$$

2.3.7.24 Numero de Reynolds Local Aguas Abajo (Re_{dw})

El número de Reynolds local aguas abajo depende de la velocidad relativa aguas abajo del disco actuador, la cuerda de la hoja y la viscosidad cinemática, expresado en la siguiente fórmula:

$$Re_{dw} = \frac{W_{dw} * c}{\nu}$$

2.3.7.25 Factor de Inducción Aguas Abajo (ad)

Aplicando la teoría BEM a cada tubo de corriente aguas abajo, se resuelve con la siguiente ecuación:

$$ad = \frac{\pi}{F_{dw} + \pi}$$

2.3.7.26 Función del Viento Aguas Abajo (F_{up})

Es la función que caracteriza las condiciones del viento aguas abajo del disco actuador

$$F_{dw} = \frac{N * c}{8 * \pi * R} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} \left(\frac{W_{dw}}{V_{ad}} \right)^2 |\sec(\theta)| (C'_N \cos(\theta) - C'_T \sin(\theta)) d\theta$$

2.3.7.27 Fuerza Normal y Tangencial Aguas Abajo (F'_N), (F'_T)

Son las fuerzas sobre el perfil aerodinámico aguas abajo del rotor, cuya magnitud y dirección varían según su posición y el ángulo azimutal θ , expresadas en la siguiente fórmula:

$$F'_N(\theta) = \frac{1}{2} C'_N \rho c \Delta h W_{dw}^2$$

$$F'_T(\theta) = \frac{1}{2} C'_T \rho c \Delta h W_{dw}^2$$

2.3.7.28 Torque Instantáneo Aguas Abajo ($Q'_{(0)}$):

Es el torque instantáneo en una ubicación azimutal correspondiente al tramo aguas abajo del rotor se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$Q'(\theta) = \frac{1}{2} C'_T \rho c R \Delta h W_{dw}^2$$

2.3.7.29 Torque Total Promedio Aguas Abajo ($Q_{dw(av)}$):

El torque total promedio aguas abajo se calcula mediante la suma del torque producido por cada alabe en cada tubo de corriente:

$$Q_{dw_{av}} = \frac{N}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} Q'(\theta) d\theta$$

2.3.7.30 Coeficiente de Torque Medio Aguas Abajo ($C_{qdw(av)}$):

Es el coeficiente de torque medio aguas abajo del disco actuador, el cual se denota por la siguiente ecuación:

$$C_{qdw_{av}} = \frac{Q_{dw_{av}}}{\frac{1}{2} \rho A R V_{\infty}^2}$$

2.3.7.31 Coeficiente de Potencia Aguas Abajo ($C_{pdw(av)}$):

El coeficiente de potencia aguas abajo se puede expresar en términos de relación de velocidad punta de la turbina y coeficiente de par medio:

$$C_{pdw} = \lambda * C_{qdw_{av}}$$

2.3.7.32 Coeficiente de Potencia Total Para un Ciclo:

$$C_p = C_{p_{up}} + C_{pdw}$$

2.3.7.33 Potencia Generada:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 * C_p \dots (Watts)$$

CAPITULO III

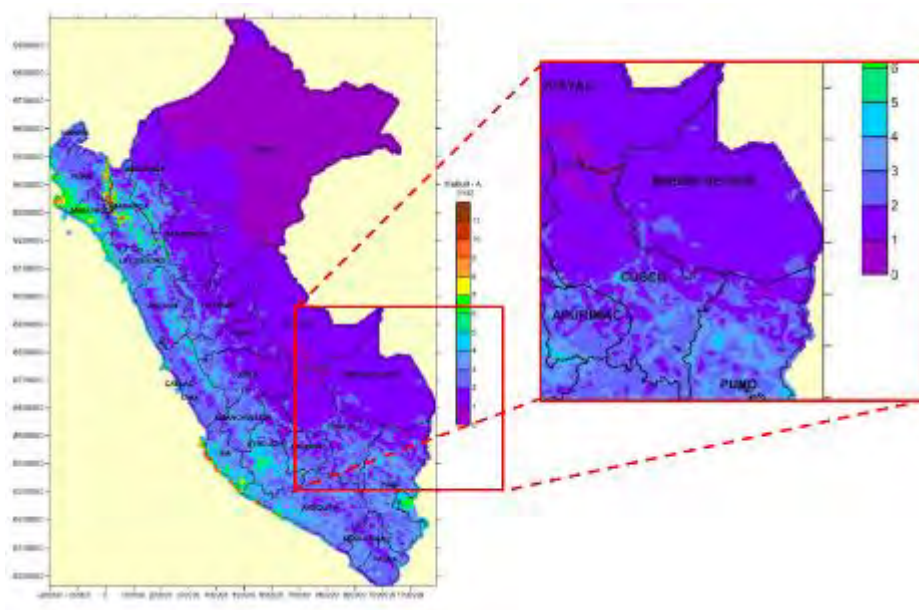
DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO GEOMÉTRICO

3.1 Condiciones Ambientales de Operación.

El presente trabajo de investigación pretende desarrollar pruebas experimentales en base a las condiciones ambientales de la región según el mapa eólico mostrado en la figura 16.

Figura 16.

Mapa eólico del Perú.



Nota: Adaptado de Atlas Eólico del Perú. (p.117) Ministerio de Energía y minas, 2016.

Antes de definir los parámetros hidráulicos del diseño, es fundamental considerar las condiciones atmosféricas de la región donde se emplazará o se probará la turbina. Estas condiciones influyen directamente el comportamiento del flujo de aire sobre el rotor y, por ende, su rendimiento aerodinámico e hidráulico.

Según el mapa eólico mostrado, la región del cusco tiene vientos a velocidades que están en el rango de 0-5 m/s, dato que se usará para los ensayos en el túnel de viento. Asimismo, para el diseño estructural, se considerará la velocidad máxima de 11 m/s. que muestra la figura 16.

La densidad del aire de la región de estudio (Cusco), es de 0.823 Kg/m³, según los datos recopilados por el centro meteorológico instalado en el Maquicentro ubicado en la UNSAAC.

La presión atmosférica de la región Cusco, es 0.875 bar, según los datos recopilados por el centro meteorológico instalado en el Maquicentro ubicado en la UNSAAC.

Tabla 2.

Condiciones ambientales promedio de operación región de cusco.

Parámetro	Valor	Unidad	Fuente
Velocidad del viento (prom.)	0 – 5	m/s	Atlas Eólico del Perú (MINEM, 2016)
Velocidad crítica	11	m/s	Condición máxima de diseño
Densidad del aire (ρ)	0.823	kg/m ³	Maquicentro UNSAAC
Presión atmosférica	0.875	Bar	Maquicentro UNSAAC
Temperatura promedio	13.7	°C	Maquicentro UNSAAC

Nota: Fuente propia

Los valores obtenidos reflejan un entorno de baja densidad de aire y velocidades de viento relativamente bajas, lo que justifica el uso de una turbina de eje vertical, más eficiente en entornos de flujo turbulento y baja velocidad.

3.2 Aplicación de las Turbinas Eólicas Existentes.

3.2.1 Aplicación de Turbinas Eólicas de Eje Horizontal.

Las turbinas de eje horizontal predominan en parques eólicos a gran escala por su alta eficiencia y producción de energía.

3.2.1.1 Ventajas y Desventajas en Turbinas Eólicas de Eje Horizontal.

La Tabla 3, se muestra las ventajas y desventajas de las turbinas eólicas de eje horizontal según las diferentes características como: instalación a una altura, instalación general, diseño del perfil aerodinámico, operación y sustentabilidad.

Tabla 3.

Ventajas y desventajas de las turbinas eólicas de eje horizontal

Características	Ventajas y Desventajas	Descripción
Instalación en una elevada altura	✓	El diseño tripala permite que las turbinas sean instaladas a una gran altura, lo que permite la intercepción de vientos de mayor velocidad.
	✓	Intercepta vientos de régimen laminar en tiempos más constantes, lo que permite un mejor rendimiento y lapsos de intermitencia energética poco habituales
	✗	Dada la altura, es necesaria la infraestructura de una torre, lo que aumenta la inversión mínima de estos.
Instalación General	✗	Instalación costosa, dados todos los elementos y requerimientos que necesita
Diseño y Perfil aerodinámico	✓	Poseen una alta eficiencia aerodinámica, con bajos coeficientes de arrastre en comparación del resto de diseños
	✓	Bajos coeficientes de pérdida aerodinámica tras la formación del remolino de viento, lo que permite la posibilidad de instalar varias turbinas de eje horizontal por filas con un riesgo mínimo de que las turbinas de la primera fila acaparen la mayor cantidad de energía
	✗	Requieren un alto par de momento para poder arrancar el generador

Operación	×	Aunque las turbinas de eje horizontal son conocidas por sus altas velocidades de rotación, la realidad es que deben operar ante un rango de velocidades bajas-medias, la gran longitud de sus palas implica un enorme peligro a altas velocidades de rotación
	×	Requieren un mantenimiento preventivo regular relativamente costoso y elaborado, que cuente con sistemas de frenado, seguridad y control. Afrontar un mantenimiento correctivo a estos aerogeneradores implica generalmente la inversión de una turbina entera
	×	Se debe contar con un sistema de amortiguamiento sonoro, los diseños de eje horizontal tienden a ser ruidosos
	×	Para poder ser eficientes, estos deben contar con un sistema de orientación que los alinee con los flujos del viento
	×	Dada la naturaleza de la energía eólica, estos sistemas de generación tienen intermitencias de energía, bastante notorias dado que muchos aerogeneradores están conectados al SEP
	✓	En términos de generación eléctrica, son las turbinas eólicas con mayor tasa de generación en existencia. Este dato escala si contamos que la implementación de estas esta adjuntada a la instalación de enormes parques eólicos
Sustentabilidad	×	Dado como se instalan los parques eólicos, estos poseen una gran disonancia con la integridad del medio ambiente. Las extensas áreas de ocupación, vibraciones y vallas; desplazan la flora y fauna local de forma permanente
	✓	Con una eficiencia media del 25%, se le considera como uno de los mejores medios de obtención de energía verde del mundo

Nota: Adaptado de “Turbina de eje vertical Darrieus tipo H para un sistema de Generación distribuida para una casa-habitación en el Estado de Puebla”. García (2022)

3.2.2 Aplicación de Turbinas Eólicas de Eje Vertical.

Las turbinas de eje vertical son comunes en entornos urbanos y residenciales por su bajo ruido y tamaño compacto. Además, su capacidad para captar viento en cualquier dirección las hace ideales para áreas con condiciones de viento inestables.

3.2.2.1 Ventajas y Desventajas en Turbinas Eólicas de Eje Vertical.

En la Tabla 4, se muestra las ventajas y desventajas de las turbinas eólicas de eje vertical según las diferentes características como: instalación a una baja altura, instalación general, diseño del perfil aerodinámico, operación y sustentabilidad.

Tabla 4.

Ventajas y desventajas de las turbinas eólicas de eje vertical

Características	Ventajas y Desventajas		Descripción
Instalación a una baja altura	✓		La baja altura del poste, incita a instalar el generador y el multiplicador a nivel del suelo, lo que reduce sustancialmente la inversión, el mantenimiento y los riesgos tribológicos
	✗		Se interceptan flujos de viento de menor velocidad, lo que reduce la excitación de la turbina
Instalación General	✓		Dada la naturaleza de estas turbinas, requieren menos elementos que una de eje horizontal, además de operar bajo parámetros de menor velocidad y demanda, las hace de menor costo en general.
	✗		Se evita alinear varios de estos modelos de turbina, como en un parque eólico, ya que existe una gran posibilidad de que las turbinas de la primera fila acaparen gran parte de la fuerza del viento, formando torbellinos de viento cada vez con menor fuerza conforme avanza por las filas.
	✗		Necesita la instalación de cables tensores acoplados a 2/3 de la altura máxima del poste y la base del suelo, ya que estos tienden a pandear debido a la intercepción del viento.

Diseño y perfil aerodinámico (independiente al tipo de turbina)	✗	Coeficientes de arrastre prologados y bajos TSR's, lo que dificulta romper la inercia del rotor y repercute en bajas velocidades de rotación.
	✓	Interceptan vientos de régimen turbulento con gran eficiencia y con pérdidas de energía mínimas.
Operación	✓	Son capaces de operar con bajas velocidades del viento.
	✓	Dado que requiere menos elementos para poder operar, requieren un mantenimiento preventivo menos costoso en comparación con las turbinas de eje horizontal.
	✗	Al igual que con las turbinas de eje horizontal, afrontar un mantenimiento correctivo a estos aerogeneradores implicara una inversión similar a una turbina nueva en la mayoría de los casos.
	✓	Ya que este tipo de turbinas están perpendiculares a la dirección del viento, estas no requieren un sistema de orientación.
	✓	Contaminación sonora casi nula, debido a que estas turbinas operan a bajas velocidades y por lo tanto, se puede prescindir de un sistema de amortiguamiento sonoro.
	✗	Dada la naturaleza de la energía eólica, estos sistemas de generación tienen intermitencias de energía.
Sustentabilidad	✗	En términos de generación eléctrica, las turbinas de eje vertical están muy por debajo de las tasas de eficiencia de las de eje horizontal. Esto dependerá mucho del tipo VAWT que esté operando.
	✓	Ya que estos diseños no son eficientes alineados en grupos, tal y como se haría en un parque eólico, se prefieren implementar de forma individual, alineados en una única fila o agrupados de tal forma que dibujen un cuadrado de 2x2. Por lo que su relación de sustentabilidad con respecto al espacio que ocupa es más congruente que con las turbinas de eje horizontal. Es menos invasivo y se pueden ocupar los tejados o áreas reducidas para su

instalación.



Con una eficiencia media máxima del 15%, estas turbinas son rezagadas a alimentar cargas más pequeñas. Además de que su baja eficiencia no puede compensarse instalando grandes cantidades de estos diseños, por las pérdidas de energía eólica en las primeras filas. Estas las convierte en medios de generación de energía renovable menos potente, sin embargo, puede adaptarse a un sistema de Generación Distribuida, para maximizar sus ventajas.

Nota: Adaptado de “Turbina de eje vertical Darrieus tipo H para un sistema de Generación distribuida para una casa-habitación en el Estado de Puebla”. García, (2022)

3.3 Resumen Ventajas y Desventajas de Turbinas Eólicas.

En la Tabla 5, se muestran las ventajas y desventajas en las turbinas eólicas según PARASCHIVOIU.

Tabla 5.

Ventajas y desventajas de las turbinas eólicas de eje vertical y horizontal

Aerogeneradores de eje horizontal	
Ventajas	Desventajas
– Pueden ser expuestos a vientos con velocidades altas, lo cual ocurre en las alturas. – Tiene fuerzas aerodinámicas y ángulo de ataque constantes. – Requiere menor área para ser instalado debido a que el rotor se encuentra en lo alto de la torre.	– Requiere un sistema de transmisión. – Requiere una torre alta. – El mantenimiento se debe llevar a cabo en lo alto de la torre. – Ruidosos.
Aerogeneradores de eje vertical	
Ventajas	Desventajas
– Omnidireccionales	– El rotor no se encuentra a gran altura por

-
- El rotor se encuentra cerca al nivel del suelo por lo que es simple de operar y realizar el mantenimiento.
 - Diseño simple.
 - Tecnología no muy estudiada que podría ofrecer más potencial a un menor costo.
- lo que la velocidad del viento no sería muy alta.
 - Tiene bajas velocidades en la punta por lo que también sería una baja eficiencia.
 - Requiere una mayor área para ser instalado.
-

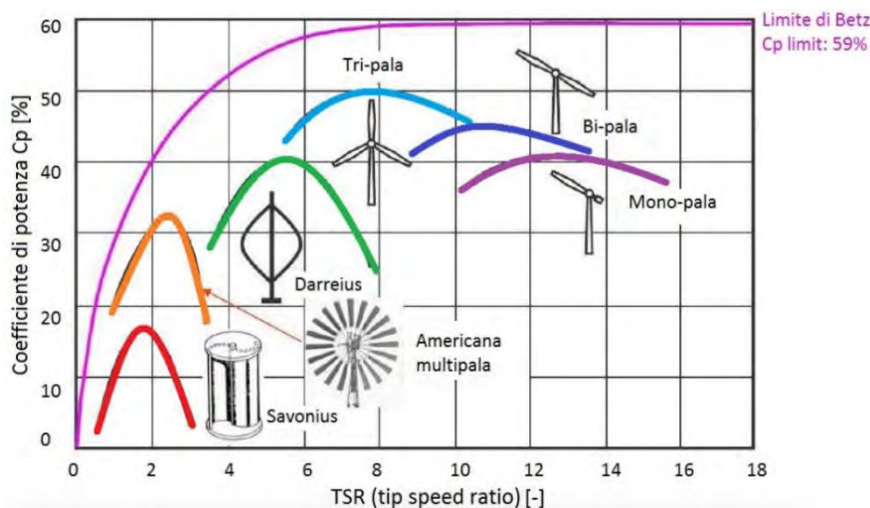
Nota: Traducido de “Wind Turbine Design” Paraschivoiu, (2002)

3.4 Curva de Funcionamiento Según su Coeficiente de Potencia en Turbinas Eólicas.

El coeficiente de potencia C_p indica cuánta energía del viento convierte el aerogenerador. El modelo Darrieus, con un rendimiento intermedio, alcanza un C_p de 0.4, siendo una opción eficiente entre las turbinas verticales para el presente diseño.

Figura 17.

Coeficiente de potencia en función del TSR en turbinas eólicas.



Nota: Tomado de “Turbine eoliche ad asse orizzontale o verticale – un confronto” (Energy Hunters, 2012).

3.5 Selección del Tipo de Turbina.

Según la información presentada, la presente investigación plantea el diseño de una turbina eólica de eje vertical tipo Darrieus. Asimismo, para definir la turbina optima se presenta la tabla 6 en la cual se muestra las ventajas y desventajas en turbinas de eje vertical.

Tabla 6.

Ventajas y desventajas de las turbinas eólicas de eje vertical.

Aspectos a evaluar	Tipo de rotor			
	Savonius	Darrieus		
		Hoja recta	Helicoidal	
Ventaja general del diseño	✓ No tiene problema con el auto arranque por el diseño de sus aspas.	✓ Fácil fabricación ✓ Fácil instalación	✓ No presenta variaciones tan grandes en la fluctuación del torque.	
	✓ Se puede fabricar dentro de las instalaciones si se utiliza un diseño sencillo.	✓ Por su diseño es fácil fabricar en el taller de la institución. ✓ Es posible utilizar moldes de materiales compuestos para su fabricación.	✓ Puede fabricarse dentro de las instalaciones del ITP aunque no será sencilla y habrá ciertos procesos que se necesiten realizar fuera de las instalaciones.	
Fabricación dentro de las instalaciones del ITP	✓ Para diseños más elaborados se requiere procesos fuera de las instalaciones e incrementa el costo de fabricación.	✓ Dentro de las instalaciones se cuenta con la maquinaria necesaria para su elaboración.		
Ensamblaje y mantenimiento	✓ La dificultad reside en el diseño, si este es sencillo puede realizarse sin problemas.	✓ Si se realiza un diseño elaborado, se puede tener un gran número de componentes lo que	✓ La dificultad del ensamblaje se concentraría solo en la parte del rotor debido a la forma de	

	✓	Con un diseño elaborado se requiere de personas especializadas en el tema además de procesos externos a los existentes en la institución.	aumentaría su dificultad de ensamblaje.	hélice de las palas.
	✓	Algunas variantes están basadas en procesos de termo fluidos e inyección de plástico.	✓ Se puede obtener las aspas a partir de estructuras armadas y sesiones laminadas.	✓ Por la complejidad de la pala su fabricación requiere de procesos fuera de las instalaciones del ITP.
Proceso de fabricación	✓	Se puede elaborar dentro del ITP a partir de materiales compuestos como por ejemplo la fibra de vidrio.		
	✓	Dependiendo de su diseño se pueden utilizar diversos materiales.	✓ Debido a la sencillez del diseño se puede elaborar con diversos materiales.	✓ Los materiales más comunes son fibra de vidrio u polímeros aunque también se puede utilizar metales.
Materiales	✓	Para un diseño sencillo en forma de “S” se puede utilizar polímeros o algunos metales.		

Nota: Adaptado de “DISEÑO DE UN GENERADOR ÉOLICO DE EJE VERTICAL TIPO DARRIEUS HELICOIDAL DE 3 KW” (Mendoza, 2017).

Según la tabla 6 se plantea el estudio de una turbina eólica de eje vertical tipo Darrieus Helicoidal debido a que no presenta variaciones en la fluctuación del torque generado, puede ser fabricado en la región, puede ser fabricado en polímeros, madera o metal.

3.6 Consideraciones Para Pruebas Experimentales y Construcción de Prototipos.

3.6.1 *Túnel de Viento*

Es una instalación experimental para analizar la interacción del fluido (aire) en movimiento con el cuerpo sólido, cuya finalidad es evaluar el comportamiento fluidodinámico, aerodinámico, energético y estabilidad del sólido.

El desarrollo de pruebas experimentales en un túnel de viento hace posible verificar de forma directa la interacción del fluido con el cuerpo y así se proponen mejoras y optimización de los diseños, al mismo tiempo se genera un ahorro económico y tiempo de ensayos.

3.6.2 *Características del Túnel de Viento*

En la actualidad la escuela profesional de Ingeniería Mecánica de la UNSAAC tiene implementado un túnel de viento que fue construido en el desarrollo de la tesis titulada “Diseño y fabricación de un módulo de laboratorio para el estudio experimental de la potencia del perfil NACA 64(4)-421 en una turbina eólica en la ciudad del Cusco, 2016”. Las características principales del equipo son los siguientes; el equipo tiene un ventilador con un motor eléctrico de 2Hp de potencia a 1715RPM.

La cámara de prueba tiene una sección transversal de 600 x 600 mm. y un largo de 1400 mm.

Figura 18.

Túnel de viento.



Nota: Tomado de “Diseño y fabricación de un módulo de laboratorio para el estudio experimental de la potencia del perfil NACA 64(4)-421 en una turbina eólica en la ciudad del Cusco, 2016” (Navarro y Quispe, 2018).

3.6.3 Similitud Geométrica.

Bastankhah y Porté (2017) El modelo a escala debe mantener la geometría similar al prototipo, con igual relación de escala en rotor, altura del buje y dimensiones del terreno. Para modelar el flujo en terrenos complejos, el factor de escala mínimo recomendado es 1:500.

3.6.4 Similitud de Flujo

He et al. (2022) El número de Reynolds y el TSR determinan la similitud entre el flujo en el túnel de viento y a escala real. Sin embargo, el Reynolds de la turbina modelo es uno o dos órdenes menor que su equivalente en tamaño real. (Nakhchi et al., 2021) En sus estudios, demostraron que las pruebas en túnel de viento reproducen con precisión la rotación de la estela,

vórtices de punta y estructuras turbulentas. Por lo tanto, se puede descuidar el número de Reynolds.

3.6.5 Similitud Dinámica.

He et al. (2022) El coeficiente de empuje es clave para evaluar cómo las condiciones de operación afectan la estela de la turbina. Se busca mantener la similitud de este coeficiente entre el modelo y el prototipo para garantizar resultados representativos.

3.6.6 Efecto de Bloqueo

Krogstad y Eriksen (2013) El efecto de bloqueo es la relación entre el área barrida del rotor y la sección transversal del túnel de viento. Si esta es menor al 10 %, la interferencia del flujo con las paredes del túnel es insignificante.

3.7 Parámetros Geométricos de la Turbina Seleccionada

3.7.1 Área de la Sección Transversal del Túnel de Viento

Los lados de la sección transversal del túnel de viento tienen dimensiones de 600mm. cada lado entonces el área será:

$$A_{tun.} = 0.360 \text{ m}^2$$

Donde:

$A_{tun.}$: Área de la sección transversal del túnel de viento.

3.7.2 Relación Área Transversal de la Turbina y Área Transversal Túnel de Viento

Según el apartado Efecto de bloqueo, la relación del área transversal de la turbina con el área transversal de la cámara de prueba del túnel de viento deberá cumplir la siguiente relación.

$$\frac{A_{turb.}}{A_{tun.}} < 10\%$$

Donde:

$A_{turb.}$: Área de la sección transversal de la turbina.

$A_{tun.}$: Área de la sección transversal del túnel de viento.

3.7.3 Área de la Sección Transversal de la Turbina

En la presente investigación, el área de la sección transversal de la turbina estará limitado por la condición del efecto de bloqueo, es por ello que será denotado de la siguiente manera:

$$A_{turb.} < 0.1 * A_{tun.}$$

$$A_{turb.} < 0.1 * 0.360 \text{ m}^2$$

$$A_{turb.} < 0.036 \text{ m}^2$$

Se estableció que el área máxima de barrido de la turbina no debe superar los 0.036 m². Esta restricción condicionará directamente el diámetro y altura de la turbina seleccionada.

3.7.4 Relación Altura – Diámetro de la Turbina

Hernández (2016) En su tesis corrobora que cuando la relación altura – diámetro del rotor Darrieus tipo H es igual a 1, se obtiene un mayor coeficiente de potencia. Asimismo, (Divakaran et al., 2021) concluye que un rotor con una relación de altura y diámetro igual a 2 ($H/D = 2$) presenta una mayor tasa de transformación de la energía cinética del viento a diferentes ángulos de inclinación.

La relación altura – diámetro para el presente trabajo de investigación será 1, para obtener una mayor solidez en la turbina.

$$R_{H-D} = 1$$

$$R_{H-D} = \frac{H}{D} = 1$$

$$H = D$$

Donde:

R_{H-D} : Relación altura – diámetro.

H: Altura de la turbina.

D: Diámetro de la turbina.

3.7.5 Diámetro de la Turbina

Según la relación de aspecto, la altura será igual al diámetro de la turbina, también se sabe que el área de sección transversal de la turbina es menor a 0.036 m^2 .

$$A_{turb.} < 0.036 \text{ m}^2$$

$$D * H < 0.036 \text{ m}^2$$

$$D * D < 0.036 \text{ m}^2$$

$$D < 0.189 \text{ m}$$

$$D = 0.185 \text{ m}$$

3.7.6 Altura de la Turbina

Se tiene la relación altura – diámetro igual a 1, entonces la altura tendrá el siguiente valor:

$$H = 0.185 \text{ m}$$

3.7.7 Numero de Palas

En el diseño de aerogeneradores, los rotores de tres palas ofrecen menores fluctuaciones en el coeficiente de potencia, asimismo presentan menor vibración en su operación.

Moghimi y Motawej (2020) En su estudio demuestra que una turbina alcanza un coeficiente de potencia optimo y una compensación de cargas aerodinámicas estable con 3 palas.

$$N = 3 \text{ palas.}$$

3.7.8 Perfil Alar

Diferentes estudios demostraron que los perfiles alares NACA simétricos son los más adecuados en el diseño de turbinas eólicas de eje vertical y ofrecen menores fluctuaciones en el coeficiente de potencia C_p .

Vásquez (2023) En su estudio concluye que el perfil alar NACA 0015 resulta más eficiente frente a los perfiles NACA 0008, NACA 0010 y NACA 0012.

En base a los diferentes estudios, la presente investigación plantea en su diseño el perfil alar NACA0015, debido a que el perfil tiene un buen equilibrio aerodinámico y resistencia estructural, también presenta buen comportamiento a bajos Números de Reynolds.

Con el perfil alar seleccionado podemos definirlo matemáticamente de la siguiente manera:

- **NACA 00XX:** Representa un perfil simétrico con una línea media en $y=0$.
- **15:** Representa el espesor máximo con un 15% de la cuerda.

3.7.9 Solidez de la Turbina

La solidez es un parámetro de diseño que relaciona el número de palas, la cuerda del perfil y el radio de la turbina. (Mohammed et al., 2019) en sus estudios demuestran que una solidez de 1.2 a 0.9 resultan más confiables y se alcanza un coeficiente de potencia óptimo.

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= 0.9 \\ \sigma_2 &= 1.2\end{aligned}$$

3.7.10 Cuerda del Perfil

$$c_1 = \frac{\sigma_1 * D}{2 * N}$$
$$c_1 = \frac{0.9 * 0.185 \text{ m.}}{2 * 3}$$

$$c_1 = 0.0277 \cong 0.03 \text{ m.}$$

$$c_2 = \frac{\sigma_2 * D}{2 * N}$$

$$c_2 = \frac{1.2 * 0.185 \text{ m.}}{2 * 3}$$

$$c_2 = 0.037 \cong 0.04 \text{ m.}$$

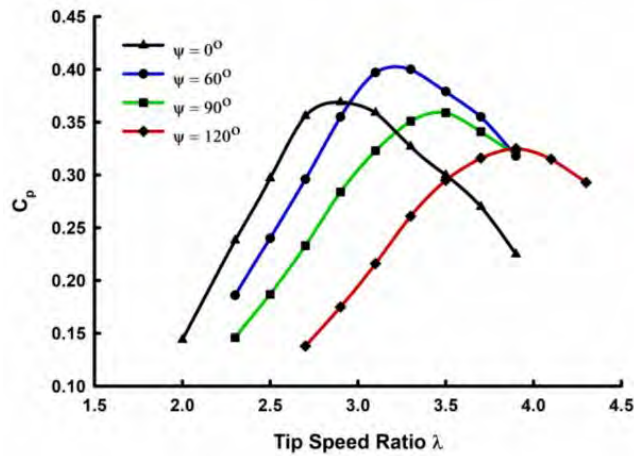
3.7.11 Angulo Helicoidal

Mendoza (2017) En turbinas Darrieus, las fuerzas aerodinámicas fluctúan durante cada ciclo, generando cargas variables que aceleran la fatiga estructural y reducen su vida útil. Además, estas oscilaciones afectan la estabilidad de la potencia de salida, provocando variaciones significativas en el tiempo.

El profesor Alexander Gorlov propuso usar palas helicoidales para eliminar el par pulsante. Este diseño asegura que siempre haya una sección de la pala en cada ángulo de ataque posible, mejorando la estabilidad y eficiencia aerodinámica de la turbina. Asimismo, estudios desarrollados por Divakaran et al. (2021) y Alaimo et al. (2015) Obtienen un mejor resultado en el coeficiente de potencia y coeficiente de par con un Angulo helicoidal de 60°, ver figura 18 y figura 19.

Figura 19.

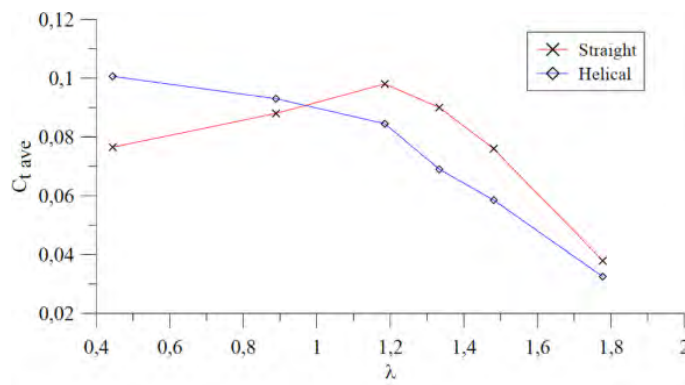
Coeficiente de rendimiento del eje vertical Darrieus para varios ángulos de hélice.



Nota: Tomado de “Effect of helix angle on the performance of helical vertical axis wind turbine” Divakaran et al., (2021).

Figura 20.

Coeficiente de par para configuraciones rectas y helicoidales a 60°.



Nota: Tomado de “3D CFD analysis of a vertical axis wind turbine” Alaimo et al., (2015).

Considerando los estudios desarrollados por los distintos autores, los cálculos para el presente diseño se desarrollarán con un ángulo helicoidal de 60°.

3.7.12 Diseño Geométrico del Perfil Alar

3.7.12.1 Ecuación del Perfil.

La ecuación proviene de un desarrollo empírico-experimental realizado por la National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) en los años 1920-1930. Estos perfiles tenían formas artesanales y su diseño se desarrollaba a prueba-error, es por ellos que con el pasar de los años decidieron crear perfiles definidos por ecuaciones matemáticas y para el caso particular NACA0015, la ecuación que la rige es la siguiente:

$$y_t = 5t(0.2969\sqrt{x} - 0.1260x - 0.3516x^2 + 0.2843x^3 - 0.1015x^4)$$

Sustituyendo $t=0.15$:

$$y_t = 0.75(0.2969\sqrt{x} - 0.1260x - 0.3516x^2 + 0.2843x^3 - 0.1015x^4)$$

Con los datos de $c_1=0.03m$ y $c_2=0.04m$, se procede a calcular el espesor máximo para los dos casos propuestos y serían los siguientes:

$$t_{max1} = 0.15 * c_1 = 0.15 * 0.03m = 0.0045m = 4.5mm.$$

$$t_{max2} = 0.15 * c_2 = 0.15 * 0.04m = 0.006m = 6mm.$$

3.7.12.2 Escalamiento de Coordenadas.

La ecuación trabaja con x normalizado desde $x=0$ a $x=1$, para obtener una geometría suave, los valores de x tendrán que ser divididos en segmentos más pequeños, entonces para el escalamiento a dimensiones reales, se trabaja con la siguiente ecuación:

$$X = x * c$$

$$Y = y_t * c$$

3.7.12.3 Generación de coordenadas.

Para la generación de las coordenadas, se toman valores de $0 \leq x \leq 1$, y $\Delta x = 0.05$.

Tabla 7.

Coordenadas para el perfil alar NACA0015 con cuerda $c=0.03$.

NACA0015 con una cuerda $c_l=0.03\text{m}$			
X	X (m)	Ysup. (m)	Yinf. (m)
0.00	0.0000	0.00000	0.00000
0.05	0.0015	0.00133	-0.00133
0.10	0.0030	0.00176	-0.00176
0.15	0.0045	0.00200	-0.00200
0.20	0.0060	0.00215	-0.00215
0.25	0.0075	0.00223	-0.00223
0.30	0.0090	0.00225	-0.00225
0.35	0.0105	0.00223	-0.00223
0.40	0.0120	0.00218	-0.00218
0.45	0.0135	0.00209	-0.00209
0.50	0.0150	0.00199	-0.00199
0.55	0.0165	0.00186	-0.00186
0.60	0.0180	0.00171	-0.00171
0.65	0.0195	0.00155	-0.00155
0.70	0.0210	0.00137	-0.00137
0.75	0.0225	0.00119	-0.00119
0.80	0.0240	0.00098	-0.00098
0.85	0.0255	0.00077	-0.00077
0.90	0.0270	0.00054	-0.00054
0.95	0.0285	0.00030	-0.00030
1.00	0.0300	0	0

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 8.*Coordenadas para el perfil alar NACA0015 con cuerda $c=0.04$.*

NACA0015 con una cuerda $c_l=0.04\text{m}$			
X	X (m)	Ysup. (m)	Yinf. (m)
0.00	0.0000	0.00000	0
0.05	0.0020	0.00178	-0.00178
0.10	0.0040	0.00234	-0.00234
0.15	0.0060	0.00267	-0.00267
0.20	0.0080	0.00287	-0.00287
0.25	0.0100	0.00297	-0.00297
0.30	0.0120	0.00300	-0.00300
0.35	0.0140	0.00297	-0.00297
0.40	0.0160	0.00290	-0.00290
0.45	0.0180	0.00279	-0.00279
0.50	0.0200	0.00265	-0.00265
0.55	0.0220	0.00248	-0.00248
0.60	0.0240	0.00228	-0.00228
0.65	0.0260	0.00207	-0.00207
0.70	0.0280	0.00183	-0.00183
0.75	0.0300	0.00158	-0.00158
0.80	0.0320	0.00131	-0.00131
0.85	0.0340	0.00103	-0.00103
0.90	0.0360	0.00072	-0.00072
0.95	0.0380	0.00040	-0.00040
1.00	0.0400	0	0

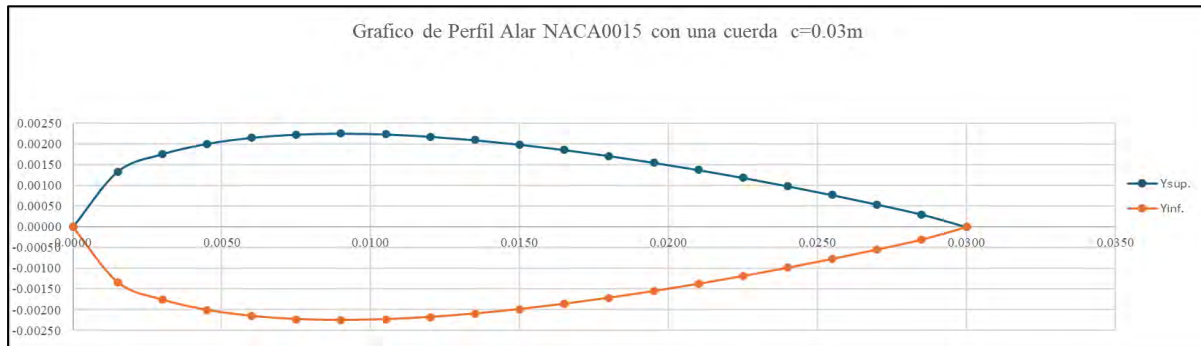
Fuente: Elaboración Propia.

3.7.12.4 Generación 3D del Perfil Alar.

Como primer paso, se genera el perfil alar en 2d según las tablas 7 y 8.

Figura 21.

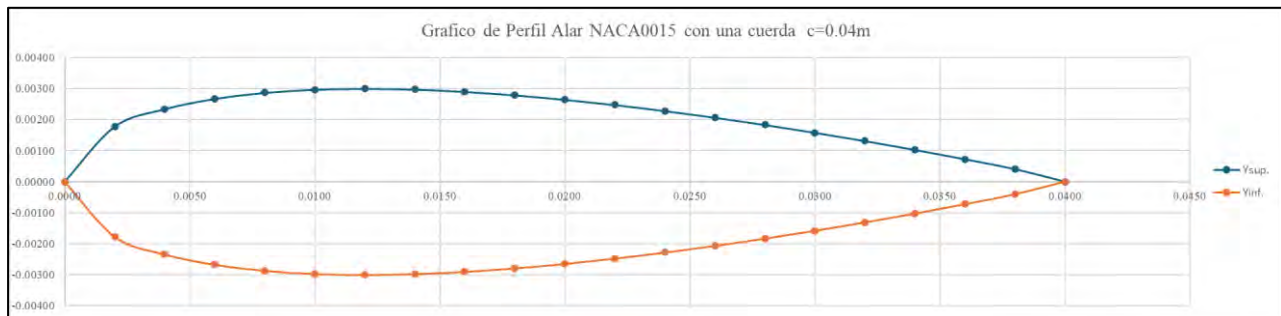
Grafica generada según la tabla 7.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 22.

Grafica generada según la tabla 8.



Fuente: Elaboración Propia.

Una vez completado la geometría 2d para $c=0.03m$ y $c=0.04m$, se completa la geometría 3d aplicando las ecuaciones siguientes, considerando un ángulo helicoidal de 60° :

$$\phi(z) = \theta * \frac{z}{H}$$

$$\phi(z) = \frac{\pi}{3} * \frac{z}{0.185}$$

Ahora convertimos el perfil 2d en superficie helicoidal:

$$\vec{r}(s, z) = \begin{bmatrix} (R \pm y(s)\cos\phi - x(s)\sin\phi) \\ (R \pm y(s)\sin\phi + x(s)\cos\phi) \\ z \end{bmatrix}$$

Con los parámetros ya definidos, procedemos a realizar el cálculo de la ecuación anterior del perfil alar en 6 secciones, para generar el modelo 3D de c_1 y c_2 , consideramos la posición del perfil alar a $s=0.3$, significa que la posición corresponde al punto donde se ubica el máximo espesor del perfil.

- Para $c_1=0.04$:

✓ Sección 1 ($z=0$; $\varphi=0^\circ$)

$$X = 0.1978$$

3.7.13 Potencia Ideal Desarrollada Por la Turbina

La potencia ideal desarrollada por una turbina eólica está limitada por el límite de Bentz el cual establece que solo el 59.3% de la energía eólica es aprovechado por cualquier turbina eólica. Dicho ello, se realiza los cálculos con los datos presentes.

$$P_{ide. Turbina} = 0.593 * P_{eolica}$$

$$P_{ide. Turbina} = 0.593 * \frac{1}{2} * \rho * A_{turb.} * v^3$$

$$P_{ide. Turbina} = 0.593 * \frac{1}{2} * 0.823 * 0.034 * 5^3$$

$$P_{ide. Turbina} = 1.037 \text{ watts.}$$

3.8 Propuesta de Diseño de la Turbina.

Según la información recopilada y los previos cálculos desarrollados, se plantea una turbina con las siguientes características:

Tabla 9.*Parámetros geométricos de la turbina eólica.*

Parámetro	Valor	Unidad
Diámetro de rotor (D)	0.185	m.
Altura del rotor (H)	0.185	m.
Numero de palas (N)	3	-
Cuerda de la pala (c)	0.03; 0.04	m.
Perfil alar	NACA 0015	-
Angulo helicoidal (Ψ)	60	°

Fuente: Elaboración Propia.

El diseño geométrico propuesto respeta la relación $H/D = 1$ para asegurar una distribución de fuerzas más uniforme y un rendimiento estable. La cuerda de la pala será evaluada en dos escenarios (0.03 m y 0.04 m) para analizar su impacto en el rendimiento hidráulico.

CAPITULO IV

DESARROLLO DEL DISEÑO AERODINÁMICO

4.1 Cálculo de Viscosidad Cinemática.

En el capítulo anterior se recopila datos de densidad del aire y temperatura promedio $\rho=0.823 \text{ kg/m}^3$; $T=13.7 \text{ }^\circ\text{C}$, para la región Cusco, entonces la viscosidad cinemática con una viscosidad dinámica y temperatura en condiciones normales quedaría de la siguiente manera:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{\eta_0 * \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2}}{\rho} \text{ (m}^2\text{/s)}$$
$$\nu = \frac{1.716 * 10^{-5} * \left(\frac{273.15 + 13.7}{273.15}\right)^{3/2}}{0.823}$$
$$\nu = 2.1745 * 10^{-5} \text{ (m}^2\text{/s.)}$$

4.2 Número de Reynolds.

En este apartado se hace el cálculo del número de Reynolds, previamente calculado la viscosidad cinemática y para una velocidad de viento $V_\alpha=5 \text{ m/s.}$, quedaría de la siguiente manera:

$$Re_p = \frac{V_\alpha * D}{\nu}$$
$$Re_p = \frac{5 * 0.185}{2.1745 * 10^{-5}}$$
$$Re_p = 42545.29$$

4.3 Coeficiente de Sustentación.

Para determinar el coeficiente de sustentación del perfil alar NACA 0015 se consideró el número de Reynolds, ya que este influye directamente en sus valores.

La gráfica del coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque fue obtenida en el software QBlade. El análisis se realizó para un número de Reynolds de $Re = 42545.29$.

Figura 23.

Coeficiente de sustentación (C_l), para un número de Reynolds $Re_p=42545.29$.



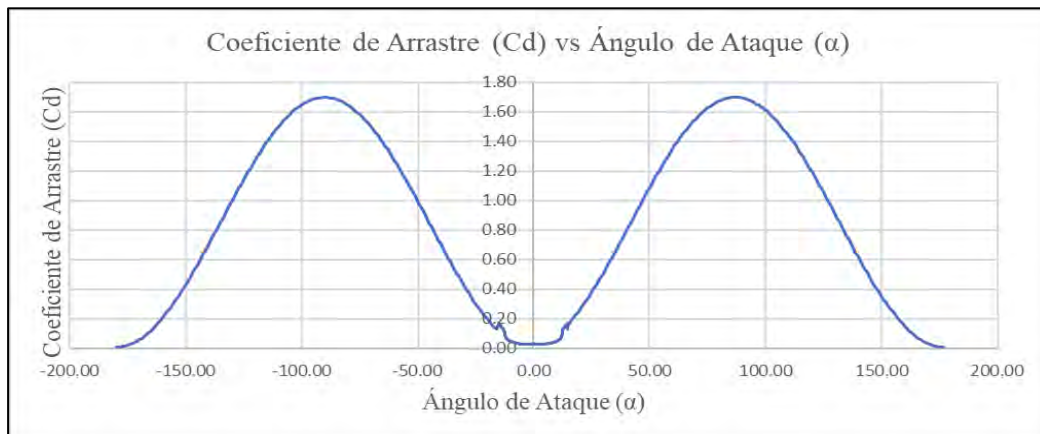
Fuente: Elaboración Propia, Generado en el software Qblade.

4.4 Coeficiente de Arrastre.

De igual manera, para determinar el coeficiente de arrastre del perfil alar, es necesario tener como base el número de Reynolds, a continuación, en la figura 20, se muestra la gráfica del coeficiente de arrastre en función del ángulo de ataque que se obtuvo en el software Qblade para un perfil alar NACA0015 con un número de Reynolds $Re_p=42545.29$

Figura 24.

Coeficiente de arrastre (C_d), para un número de Reynolds $Re_p=42545.29$.



Fuente: Elaboración Propia, Generado en el software Qblade.

4.5 Número de Tubos de Corriente Verticales (Nv) y Horizontales (Nh).

De acuerdo con el modelo matemático DMST aplicado a palas curvas, y como se indicó previamente, la cantidad de divisiones en el plano horizontal y vertical dependen de la variación del ángulo para este caso es $\Delta\theta=30^\circ$ y del ángulo helicoidal $\psi=60^\circ$, entonces, las divisiones en los dos planos quedarían de la siguiente manera:

$$N_h = \frac{180^\circ}{\Delta\theta}$$

$$N_h = \frac{180^\circ}{15^\circ}$$

$$N_h = 12$$

$$N_v = \frac{\psi}{\Delta\theta}$$

$$N_v = \frac{60^\circ}{15^\circ}$$

$$N_v = 4$$

4.6 Implementación Del Algoritmo.

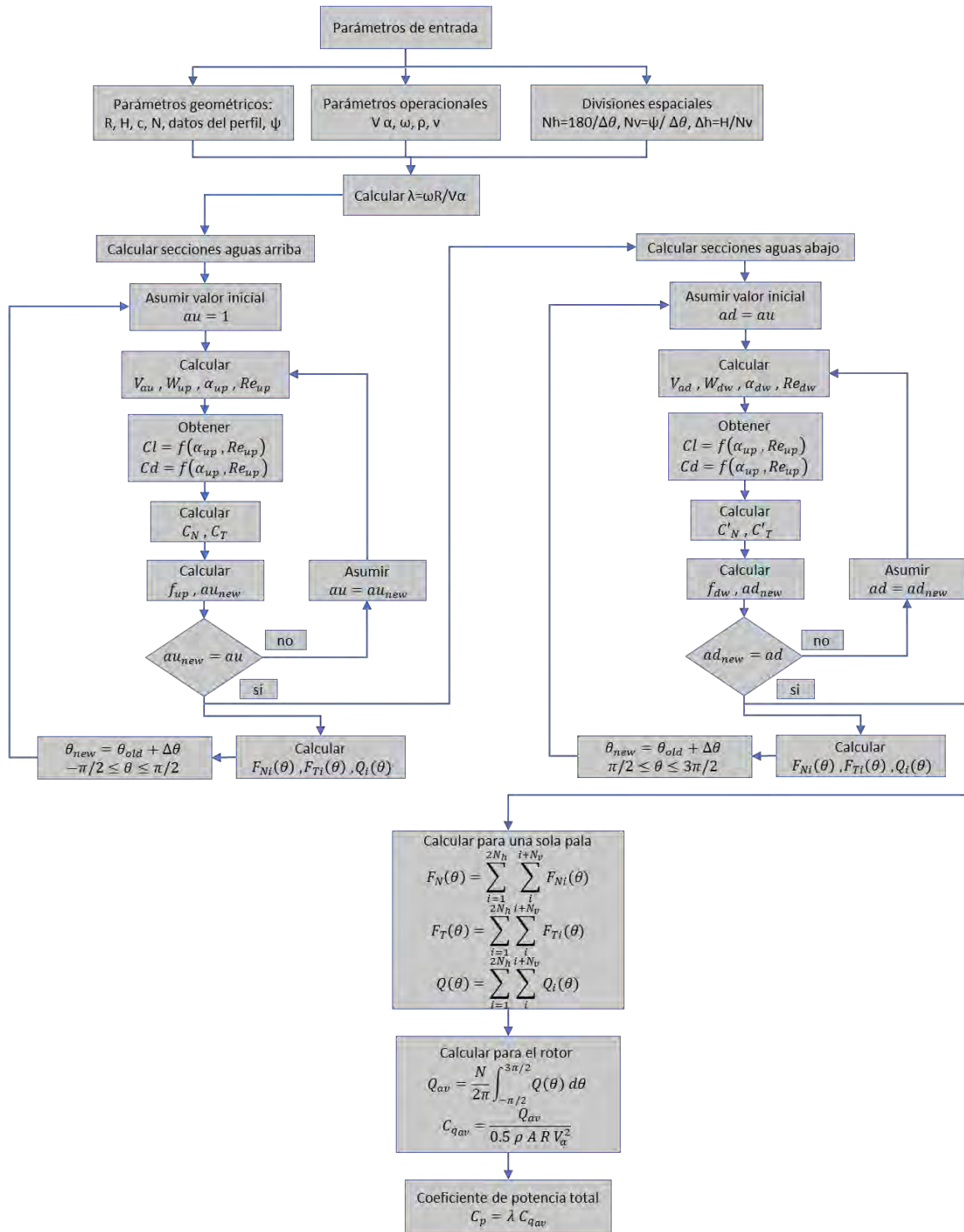
4.6.1 Código Computacional Del Modelo Matemático DMST.

Para poder determinar el valor del coeficiente de potencia, torque promedio, fuerzas tangenciales y fuerzas normales presentes en el aerogenerador de eje vertical Darrieus helicoidal, se desarrolló un algoritmo en Matlab siguiendo el flujograma de la figura 22 El cual muestra la secuencia de pasos e iteraciones presentes en el modelo matemático DMST con la finalidad de obtener el coeficiente de potencia.

Los parámetros de entrada requeridos en el programa computacional, se muestra en la tabla 10 el cual se subdividen en parámetros geométricos, parámetros operacionales y divisiones espaciales.

Figura 25.

Diagrama de flujo del modelo matemático DMST.



Nota: Adaptado de “Developed DMST model for performance analysis and parametric evaluation of Gorlov vertical axis wind turbines” Moghimi y Motawej (2020).

Para realizar la simulación aerodinámica del rotor, se establecieron condiciones de contorno basadas en datos meteorológicos y parámetros físicos previamente determinados en el diseño hidráulico.

Tabla 10.

Parámetros de entrada.

Parámetros geométricos	Valor	Unidad
Radio del rotor (R)	0.0925	m.
Altura del rotor (H)	0.185	m.
Numero de palas (N)	3	-
Cuerda de la pala (c)	0.030; 0.040	m.
Perfil alar	NACA 0015	-
Angulo helicoidal (ψ)	$\pi/3$	rad.
Parámetros operacionales		
Velocidad del viento (V_a)	3.0; 4.0; 5.0; 6.0	m/s.
Velocidad angular (ω)	Variable	rad/s.
Densidad del aire (ρ)	0.823	Kg/m ³
Viscosidad cinemática (ν)	$2.17415 \cdot 10^{-5}$	m ² /s.
Divisiones espaciales		
Variación del ángulo azimutal ($\Delta\theta$)	$\pi/15$	rad.
Numero de tubos verticales (N_v)	4	-
Numero de tubos horizontales (N_h)	12	-
Parámetros para la iteración		
Valor inicial factor de inducción (au)	1	-
Residuo inicial para validación inicial (res)	0.1	-
Residuo de validación (e)	0.0001	-

Fuente: Elaboración Propia.

Una vez definido los parámetros de entrada, se procedió a desarrollar el código Matlab (ver Anexo5), una vez obtenido el código, se ejecutó para 2 valores de cuerda ($c_1=0.03$, $c_2=0.04$) y 4 valores de velocidad de viento ($V_1=3.0$ m/s; $V_2=4.0$ m/s; $V_3= 5.0$ m/s; $V_4= 6.0$ m/s).

4.6.2 Resultados del Cálculo Desarrollado por el Código Matlab.

Como resultado de cálculo se muestra la Tabla 11 para una cuerda $c_1=0.03$ m, y Tabla 12 para una cuerda $c_2=0.04$ m, en la cual se obtiene los coeficientes de potencia para las para los 8 casos mencionados. Asimismo, cabe señalar que los coeficientes de potencia máximos dependen de la velocidad Angular de rotación del rotor, es por ello que se realizará varias iteraciones para poder determinar la velocidad angular óptima para cada caso.

Tabla 11.

Resultado del coeficiente de potencia y TSR para $c_1=0.03$ m.

LONGITUD DE CUERDA $c_1=0.03$ m.				
TSR	Velocidad angular (rad/s.)	Velocidad angular (RPM)	Coeficiente de potencia (Cp)	Potencia (W)
0.0	0.00	0	0.000	0.0000
0.1	3.65	35	0.003	0.0012
0.2	7.30	70	0.007	0.0027
0.3	10.95	105	0.013	0.0049
0.5	14.60	139	0.022	0.0083
0.6	18.24	174	0.034	0.0131
0.7	21.89	209	0.050	0.0189
0.8	25.54	244	0.066	0.0252
0.9	29.19	279	0.088	0.0336
1.0	32.84	314	0.113	0.0428
1.1	36.49	348	0.150	0.0571
1.2	40.14	383	0.183	0.0696
1.4	43.78	418	0.234	0.0890
1.5	47.43	453	0.282	0.1073
1.6	51.08	488	0.331	0.1257
1.7	54.73	523	0.394	0.1498
1.8	58.38	557	0.408	0.1550
1.9	62.03	592	0.416	0.1582

2.0	65.68	627	0.423	0.1610
2.1	69.32	662	0.406	0.1543
2.3	72.97	697	0.379	0.1441
2.4	76.62	732	0.354	0.1345
2.5	80.27	767	0.353	0.1341
2.6	83.92	801	0.315	0.1197
2.7	87.57	836	0.185	0.0705

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 12.

Resultado del coeficiente de potencia y TSR para $c_2=0.04m$.

LONGITUD DE CUERDA $c_2=0.04$ m.				
TSR	Velocidad angular (rad/s.)	Velocidad angular (RPM)	Coeficiente de potencia (Cp)	Potencia (W)
0	0.00	0	0.000	0.0000
0.1	3.24	31	0.003	0.0013
0.2	6.49	62	0.008	0.0030
0.3	9.73	93	0.014	0.0054
0.4	12.97	124	0.022	0.0084
0.5	16.22	155	0.035	0.0133
0.6	19.46	186	0.052	0.0198
0.7	22.70	217	0.068	0.0257
0.8	25.95	248	0.091	0.0344
0.9	29.19	279	0.115	0.0437
1	32.43	310	0.143	0.0546
1.1	35.68	341	0.187	0.0711
1.2	38.92	372	0.222	0.0846
1.3	42.16	403	0.279	0.1059
1.4	45.41	434	0.332	0.1261
1.5	48.65	465	0.343	0.1305
1.6	51.89	496	0.319	0.1211
1.7	55.14	527	0.371	0.1411
1.8	58.38	557	0.375	0.1425
1.9	61.62	588	0.372	0.1414
2	64.87	619	0.362	0.1375
2.1	68.11	650	0.356	0.1353
2.2	71.35	681	0.330	0.1257
2.3	74.60	712	0.301	0.1145
2.4	77.84	743	0.133	0.0504

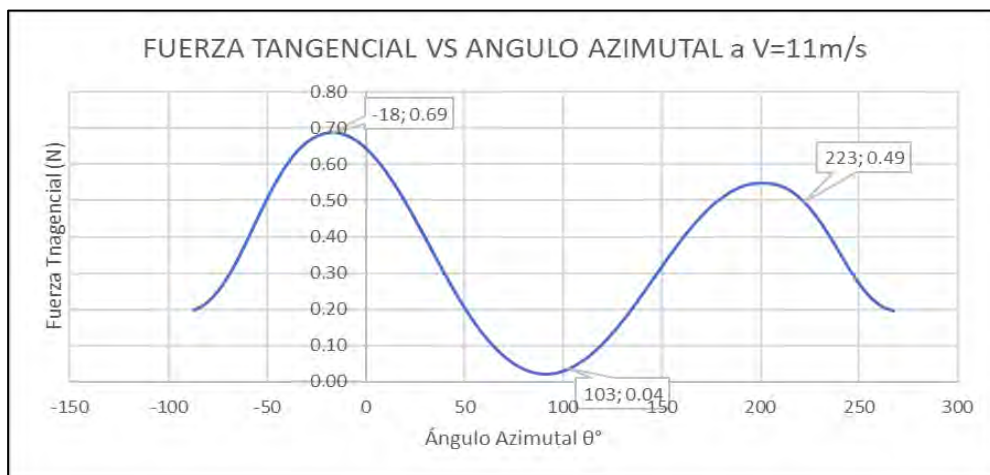
Fuente: Elaboración Propia.

4.7 Carga Crítica.

Para el diseño del conjunto turbina eólica, es necesario plantear una carga crítica el cual se establece según el apartado 5.1, se considera una velocidad de viento $V=11$ m/s. Según el algoritmo desarrollado y con la ayuda del software Qblade, se obtienen las fuerzas tangenciales y normales en una pala a lo largo de una revolución como se muestra en la figura 26 y figura 27.

Figura 26.

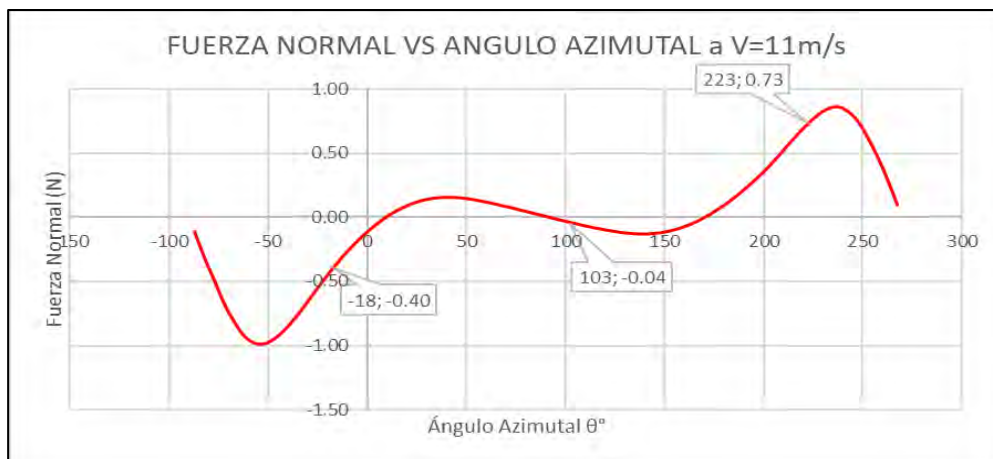
Fuerza tangencial vs ángulo azimutal a una velocidad de viento $V=11$ m/s.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 27.

Fuerza normal vs ángulo azimutal a una velocidad de viento $V=11$ m/s.

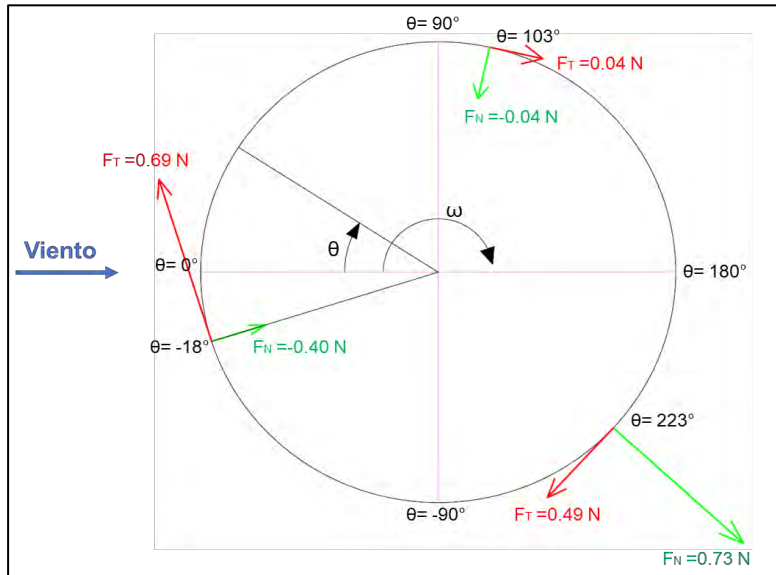


Fuente: Elaboración Propia.

De la figura 27, se observa que la carga máxima se da en un ángulo azimutal de -18° también se sabe que el rotor consta de 3 palas distribuidas a 120° , entonces la distribución de fuerzas en el rotor quedaría como se muestra en la figura 28.

Figura 28.

Distribución de fuerzas en el rotor.

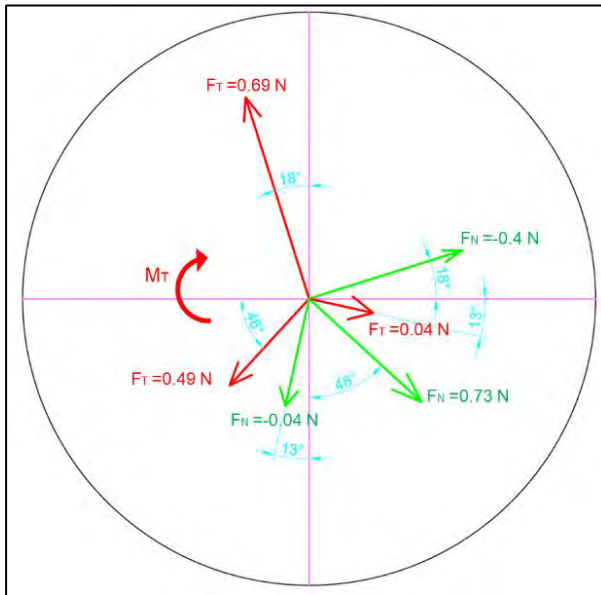


Fuente: Elaboración Propia.

Para hallar la fuerza resultante, es necesario aplicar la traslación de fuerzas al centro de rotación de la turbina el cual también se generará un torque resultante cuyo esquema se muestra en la figura 29.

Figura 29.

Distribución de fuerzas en el rotor.



Fuente: Elaboración Propia.

De la figura 29 se obtiene la fuerza resultante y torque resultante de 0.43N y 112.85 Nmm.

CAPITULO V

DISEÑO MECÁNICO

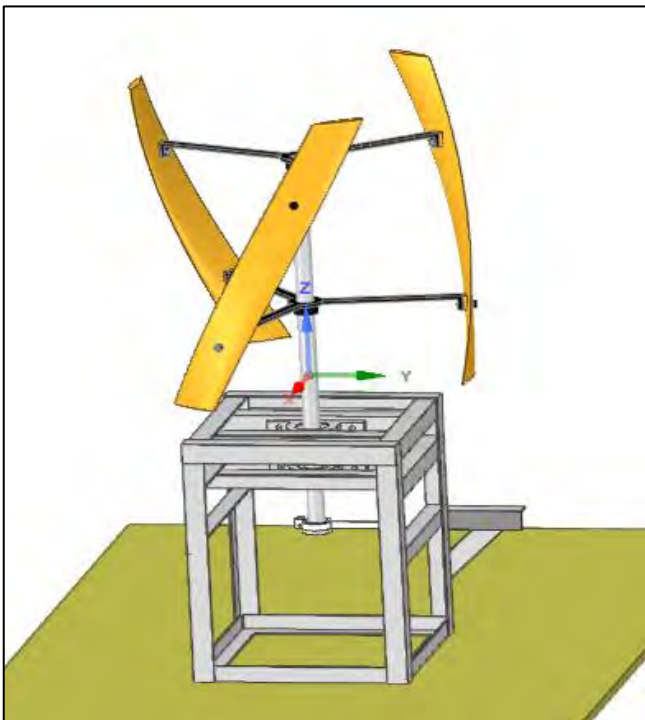
5.1 Esquema de Operación.

La turbina eólica está ubicada en la parte interna del túnel de viento, se sujeta a una estructura soporte adicional que a su vez está anclado a la estructura del túnel mediante tornillos.

La turbina consta de tres palas helicoidales a 60° con perfil alar NACA0015, 2 juego de brazos y soporte que conectan al eje mediante un prisionero. Asimismo, en la parte inferior el eje ira montado a la estructura soporte mediante 2 chumaceras y en la parte final del eje está montado un sistema freno prony.

Figura 30.

Esquema de la turbina eólica.



Nota: Elaboración propia

5.2 Materiales para la fabricación de los componentes.

Para la fabricación de los componentes se tuvo que considerar los siguientes criterios como, por ejemplo; disposición de material en el mercado local, complejidad geométrica, disponibilidad de equipos para su manufactura.

5.2.1 *Material de las Palas*

Debido al tamaño y posible deformación por el calor durante la inyección del polímero en la impresión 3D, se decide fabricarlo en impresión con resina epóxica. En la tabla 13 se muestra las propiedades mecánicas del material seleccionado.

Tabla 13.

Propiedades mecánicas y físicas de la madera pino.

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad	1150	Kg/m ³ .
Módulo de elasticidad longitudinal	3100	MPa.
Resistencia a la tracción	72.0	MPa

Nota: Tomado de “Propiedades de la resina epóxica” Monterrey & Zelandia, (1978)

5.2.2 *Material del eje*

Debido al peso del material y la ligereza que deben tener el eje, se opta por seleccionar un tubo de acero ASTM A36 cuyas propiedades mecánicas del material se muestran en la tabla 14.

Tabla 14.

Propiedades mecánicas y físicas del acero ASTM A36.

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad	7850	Kg/m ³ .
Módulo de elasticidad	200	GPa.
Resistencia a la fluencia (Sy)	250	MPa

Resistencia a la tracción (Sut)	400-500	MPa.
---------------------------------	---------	------

Nota: Tomado de “Diseño en ingeniería mecánica” Shigley, (1990).

5.2.3 Material de Brazos y Soportes

Debido a la complejidad de los elementos y considerando la ligereza que deben tener los componentes, se opta por fabricarlos en material PLA mediante impresión 3D. La tabla 13, muestra las propiedades mecánicas del material.

Tabla 15.

Propiedades mecánicas y físicas del PLA.

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad	1240	Kg/m ³ .
Resistencia a la tracción	40-70	MPa.
Módulo de elasticidad	3.3 – 3.6	GPa.
Elongación	3-6	%.

Nota: Tomado de “Propiedades del PLA” (Universidad Jaume I., 2022).

5.2.4 Material de Estructura Soporte

Debido a la falta de disponibilidad de perfil estructural ASTM-36 de dimensiones pequeñas en el mercado, se opta por fabricarlos con perfiles de aluminio. La tabla 14, muestra las propiedades mecánicas del Aluminio.

Tabla 16.

Propiedades mecánicas del aluminio.

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad	2770	Kg/m ³ .
Módulo de elasticidad	71.7	GPa.
Resistencia a la fluencia (Sy)	70	MPa

Resistencia a la tracción (Sut)	90	MPa.
---------------------------------	----	------

Nota: Tomado de “Diseño en ingeniería mecánica” Shigley, (1990).

5.3 Análisis de aceleración

Para el análisis de aceleración de la turbina es necesario tener el torque que tiene un valor de 112.85 Nmm. y el momento de inercia del rotor se obtiene del modelo 3d desarrollado que es igual a $I=0.001 \text{ kg m}^2$, con los datos presentes, se calcula la aceleración angular con la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{M_T}{I}$$

$$\alpha = \frac{112.85 * 10^{-3}}{0.001}$$

$$\alpha = 112.85 \text{ rad/s}^2$$

Donde:

α : aceleración angular (rad/s^2)

M_T : torque promedio (N.m).

I : Inercia del rotor (kg.m^2).

Según el diseño, para un viento de 11 m/s y una velocidad angular de 77.94 rad/s y una aceleración de 112.85 rad/s^2 , el tiempo para acelerar y alcanzar las RPM nominales se expresa en la siguiente ecuación:

$$t = \frac{\omega}{\alpha}$$

$$t = \frac{77.94}{112.85}$$

$$t = 0.7 \text{ s}$$

Donde:

t : tiempo (s)

ω : velocidad angular (rad/s).

α : aceleración angular (rad/s²)

5.4 Cargas de viento sobre el eje

Así como las palas de la turbina son impactados por el viento, el eje también está sometido a las cargas del viento en toda su longitud.

Por la forma redonda del eje, está sometido a una fuerza de arrastre la cual está representada por la siguiente ecuación.

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A_T v^2$$

Donde:

ρ : densidad del aire (kg/m³)

C_D : coeficiente de arrastre de la sección transversal del eje.

A_T : área transversal del eje (m²)

En la figura 31 se muestra el coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds expresada mediante la siguiente ecuación.

$$Re_{eje} = \frac{V * d}{\nu}$$
$$Re_{eje} = \frac{11 * 0.01}{2.174 * 10^{-5}}$$
$$Re_{eje} = 5059$$

Donde:

Re_{eje} : Número de Reynolds en el eje.

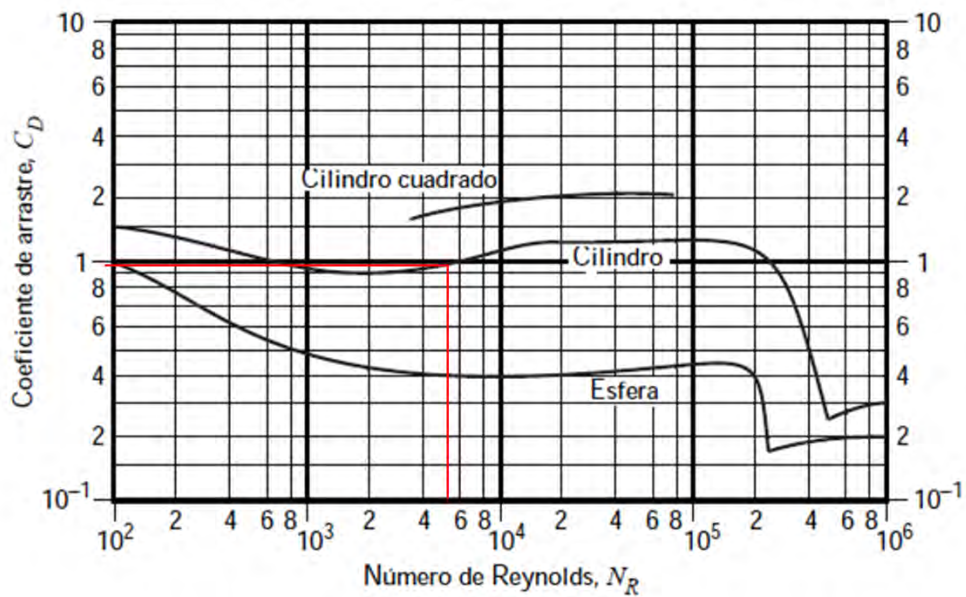
V : velocidad del aire (m/s)

d : diámetro del eje (m).

ν : viscosidad cinemática del aire.

Figura 31.

Coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds.



Nota: Tomado de “Mecánica de fluidos” Mott et al., (2015).

Según la figura 31, para un número de Reynolds $Re_{eje} = 5059$ se tiene un $C_D = 0.97$.

Reemplazando en la ecuación de la fuerza de arrastre se tiene la siguiente expresión:

$$F_D = \frac{1}{2} * 0.97 * 0.823 * 0.01 * 0.24 * 11^2$$

$$F_D = 0.116 \text{ N.}$$

En la siguiente ecuación calculamos la fuerza distribuida sobre el eje.

$$q = \frac{F_D}{L}$$

$$q = 0.483 \frac{N}{m}.$$

Donde:

L : longitud de contacto con el viento (m).

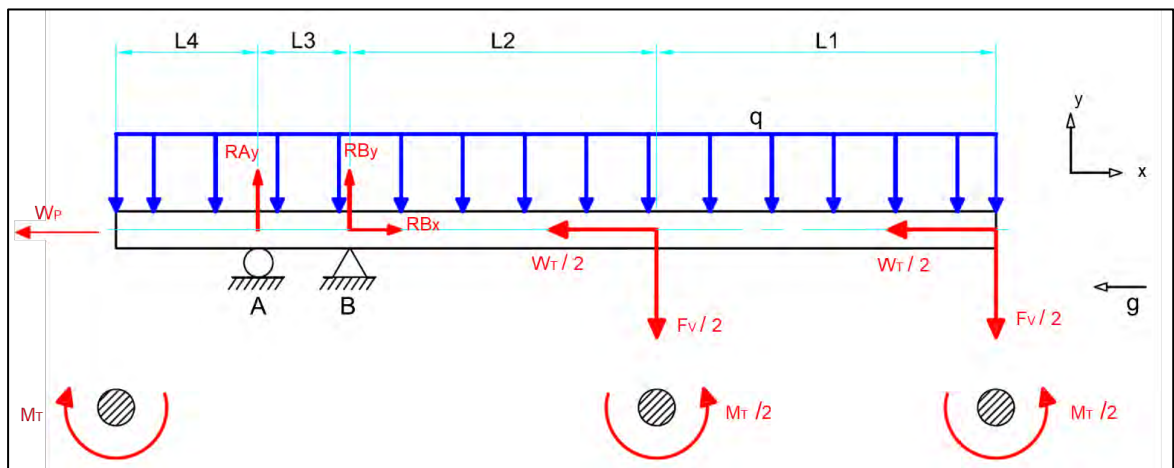
q : fuerza distribuida sobre el eje.

5.5 Diseño del eje de la turbina.

Para el dimensionamiento del eje se toman las cargas actuantes del sistema representado en el diagrama de cuerpo libre de la figura 32.

Figura 32.

Diagrama de cuerpo libre del eje de la turbina.



Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se muestran las longitudes del eje y distancias de los apoyos. Asimismo, se muestran los datos de la fuerza distribuida del viento que actúa sobre el eje, la resultante de las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre la pala y el par torsor que actúa sobre el eje.

$$L = 240.00mm.$$

$$L_1 = 94.00mm.$$

$$L_2 = 82.25mm.$$

$$L_3 = 25.00mm.$$

$$L_4 = 38.75mm.$$

$$q = 0.483N/m.$$

$$F_V/2 = 0.215 N.$$

$$M_T/2 = 56.425 Nmm.$$

Seguidamente se calcula los pesos presentes en el diagrama de cuerpo libre, cabe señalar que los valores de masa del eje, palas y soportes se tomaron en referencia al modelo 3d propuesto, considerando valores de densidad de 480 kg/m³ y 2770 kg/m³ para la madera pino y aluminio. Asimismo, los volúmenes de la pala y eje se tomaron del modelo 3d.

$$W_P = m_{eje} * g = 0.0184 * 9.81 = 0.18 N.$$

$$W_T/2 = (3 * m_{palas} + 2 * m_{brazos y soporte} + 12 * m_{tornillos}) * g$$

$$W_T/2 = (3 * 0.01133 + 2 * 0.017 + 12 * 0.00057) * 9.81 = 0.734 N.$$

Una vez obtenido los datos para el diagrama de cuerpo libre, se calcula las fuerzas de reacción en los apoyos utilizando las ecuaciones de equilibrio estático.

$$(\sum F_x = 0) \quad -W_P + RB_x - 2 * W_T/2 = 0$$

$$(\sum F_y = 0) \quad RA_y + RB_y - 2 * F_V/2 - (L * q) = 0$$

$$(\sum M_A = 0) \quad 0.025 * RB_y - 0.10725 * F_V/2 - 0.20125 * F_V/2 - 0.08125 * (L * q) = 0$$

Reemplazando los valores en la ecuación sumatoria de fuerzas en x, se tiene:

$$-W_P + RB_x - 2 * W_T/2 = 0$$

$$-0.18 + RB_x - 2 * 0.734 = 0$$

$$RB_x = 1.648 N.$$

De la ecuación sumatoria de momentos en el punto A, se tiene:

$$0.025 * RB_y - 0.10725 * F_V/2 - 0.20125 * F_V/2 - 0.08125 * (L * q) = 0$$

$$0.025 * RB_y - 0.10725 * 0.215 - 0.20125 * 0.215 - 0.08125 * (0.240 * 0.483) = 0$$

$$RB_y = 3.03 \text{ N.}$$

Reemplazando los valores en la ecuación sumatoria de fuerzas en y, se tiene:

$$RA_y + RB_y - 2 * F_V/2 - (L * q) = 0$$

$$RA_y + 3.03 - 2 * 0.215 - (0.240 * 0.483) = 0$$

$$RA_y = -2.484 \text{ N.}$$

Como resultado, se muestran los valores para las reacciones:

$$RA_y = -2.484 \text{ N.}$$

$$RB_x = 1.648 \text{ N.}$$

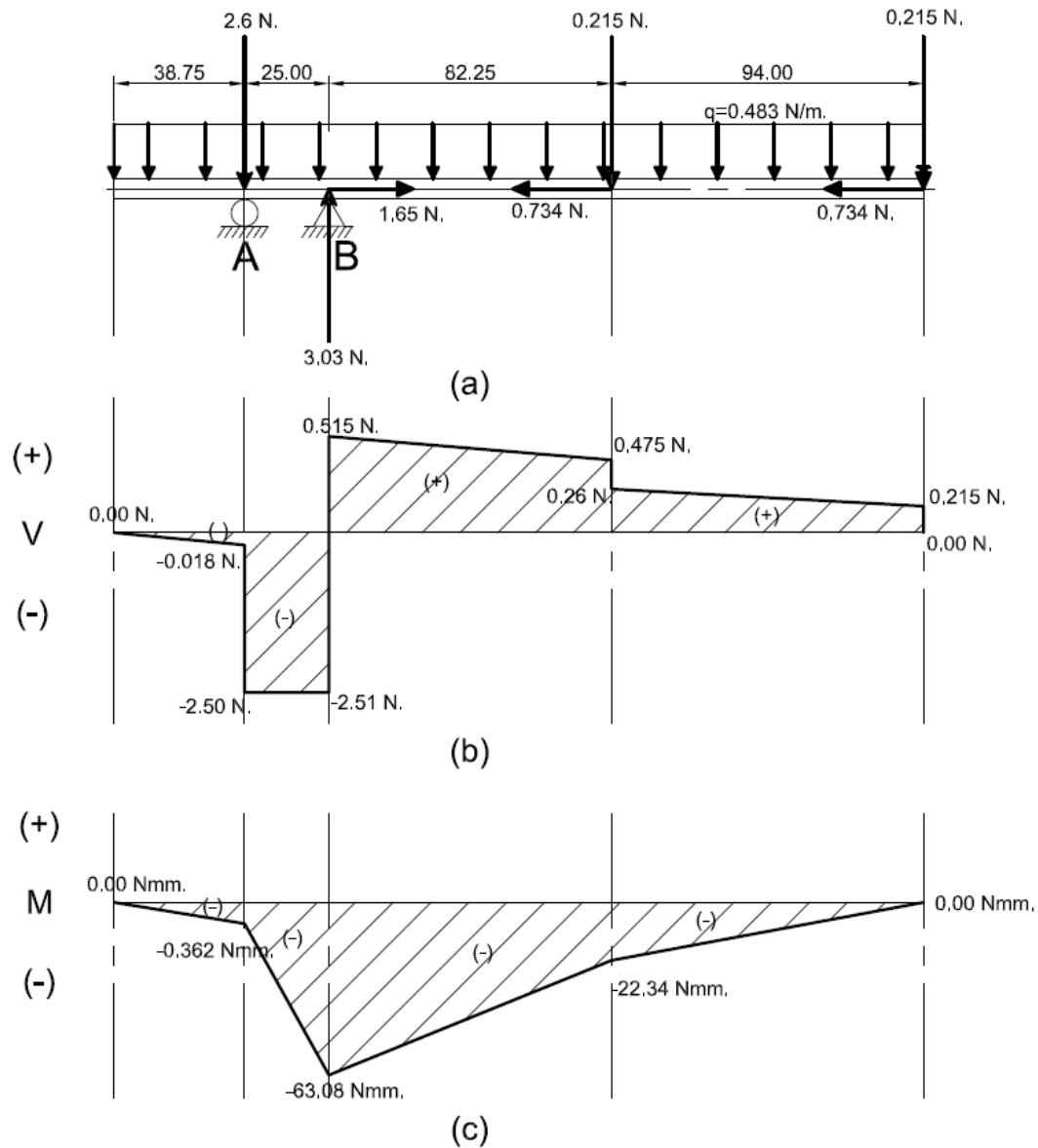
$$RB_y = 3.03 \text{ N.}$$

5.5.1 Diagrama de fuerzas cortantes y momento flector en el eje.

De los cálculos desarrollados líneas arriba, se tiene la figura 33. que muestra (a) DCL con los valores de carga en el eje, (b) diagrama de fuerzas cortantes, (b) diagrama de momento flector.

Figura 33.

Diagramas de: (a) cargas en el eje, (b) fuerzas cortantes, (b) momento flector.



Fuente: Elaboración Propia

Según la figura 33, el momento flector crítico se encuentra en el apoyo B con un valor $M_B = M_a = 63.08 \text{ Nmm}$.

5.5.2 Cálculo del diámetro del eje.

Con los datos de momento flector y torque promedio, se procede a utilizar los criterios según el código ASME como se muestra a continuación.

5.5.2.1 Ecuación ASME elíptica.

Para el dimensionado del eje, el código ASME plantea las siguientes ecuaciones.

$$d = \left\{ \frac{16 * FS}{\pi} \left[4 \left(\frac{K_f * M_a}{S_e} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} * T_a}{S_e} \right)^2 + 4 \left(\frac{K_f * M_m}{S_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} * T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3}$$

$$FS = \frac{16}{\pi * d^3} \left[4 \left(\frac{K_f * M_a}{S_e} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} * T_a}{S_e} \right)^2 + 4 \left(\frac{K_f * M_m}{S_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} * T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$S_e = K_a * K_b * K_c * K_d * K_e * K_f * S'_e$$

Donde:

K_a : Factor de modificación por la condición superficial.

K_b : Factor de modificación por el tamaño.

K_c : Factor de modificación por la carga.

K_d : Factor de modificación por la temperatura.

K_e : Factor de confiabilidad.

K_f : Factor de modificación por efectos varios.

S'_e : Limite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria.

S_e : Limite de resistencia a la fatiga en la ubicación critica de una parte de maquina en la geometría y condición de uso.

Para el desarrollo de las ecuaciones del código ASME, es necesario tener como dato el esfuerzo de fluencia y esfuerzo último del material en este caso del acero ASTM A-36 es:

$$S_{ut} = 400 \text{ MPa.}$$

Los datos de los factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga, se proceden a calcular los diferentes factores.

5.5.2.2 Factor de superficie

Para el presente cálculo se plantea un material de acero ASTM A-36 laminado en frío y un valor S_{ut} en MPa, entonces el valor de a y b serían 4.51 y -0.265 (280 Shigley, 1990), reemplazando en la siguiente ecuación obtenemos el siguiente valor:

$$\begin{aligned}K_a &= a * S_{ut}^b \\K_a &= 4.51 * 400^{-0.265} \\K_a &= 0.921\end{aligned}$$

5.5.2.3 Factor de tamaño

Para el valor factor de tamaño se considera un valor de K_b según el rango de diámetro propuesto para el presente diseño $2.79 \leq d \leq 51\text{mm}$ y para un diámetro de 10mm.

$$\begin{aligned}K_b &= 1.24 * d^{-0.107} \\K_b &= 1.24 * 10^{-0.107} \\K_b &= 0.969\end{aligned}$$

5.5.2.4 Factor de modificación de carga

Para el valor factor de modificación de carga sometido a cargas de flexión es:

$$K_c = 1.00$$

5.5.2.5 Factor de modificación por la temperatura

Según Shigley establece que, si se desconoce el límite de resistencia a la fatiga, se asume el valor:

$$K_d = 1.00$$

5.5.2.6 Factor de confiabilidad.

Para el presente diseño, se considera un diseño crítico, por lo tanto, asumiremos una confiabilidad de $z_a = 95\%$ y el factor de confiabilidad según Shigley en su tabla 6-5 nos da el siguiente valor:

$$K_e = 0.868$$

5.5.2.7 Factor de efectos varios.

Para el presente diseño, no se considera una muesca, por lo tanto, el factor de concentración de esfuerzos $k_t = 1$; $k_{ts} = 1$ y por consiguiente el valor del factor de varios efectos quedaría de la siguiente manera:

$$K_f = 1 - q * (k_t - 1)$$

$$K_f = 1 - q * (1 - 1)$$

$$K_f = 1$$

$$K_{fs} = 1 - q * (k_{ts} - 1)$$

$$K_{fs} = 1 - q * (1 - 1)$$

$$K_{fs} = 1$$

5.5.2.8 Límite de resistencia a la fatiga en vida rotatoria.

Según Shigley, para un $S_{ut} = 90\text{MPa}$, el valor del límite de resistencia a la fatiga en vida rotatoria queda de la siguiente manera:

$$S'_e = 0.5 * S_{ut}$$

$$S'_e = 0.5 * 400000000$$

$$S'_e = 200000000 \text{ Pa.}$$

Con los valores de los factores mencionados líneas arriba, se tiene el límite de resistencia a la fatiga de la siguiente manera:

$$S_e = 0.921 * 0.969 * 1 * 1 * 0.868 * 1 * 200000000$$

$$S_e = 154929146.4 \text{ Pa}$$

Para determinar el factor de seguridad adecuado de la turbina se plantea la tabla 17, en la cual se menciona los factores de seguridad recomendados por varios autores y según su aplicación. También se sabe que en el caso de eje rotatorio bajo flexión y torsión constantes se tendrán valores de 0 para el momento flector promedio (M_m) y torsión alternante (T_a).

Tabla 17.

Factores de seguridad recomendado por varios autores.

Fuente / Autor	Factor de seguridad recomendado (η)	Aplicación
<i>Manwell, McGowan & Rogers (2009)</i>	1.5 – 2.5 (estático) ≥ 3.0 (fatiga)	Diseño estructural general
IEC 61400-1 (2021)	≥ 1.5 (mínimo recomendado)	Normativa internacional
Hau, Erich (2013)	1.5 – 3.0	Componentes estructurales rotor

Fuente: Elaboración Propia.

Entonces, de la ecuación que determina el diámetro del eje con un factor de seguridad de 3, quedaría de la siguiente manera:

$$d = \left\{ \frac{16 * n}{\pi} \left[4 \left(\frac{K_f * M_a}{S_e} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} * T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3}$$

$$d = \left\{ \frac{16 * 3}{\pi} \left[4 \left(\frac{1 * 63.08 * 10^{-3}}{154929146.4} \right)^2 + 3 \left(\frac{1 * 112.85 * 10^{-3}}{250000000} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3}$$

$$d = 2.584 * 10^{-3} \text{ m.}$$

Por cuestiones de accesibilidad de material en el mercado se considera un diámetro de eje de 10mm. en acero ASTM A36.

Con el diámetro del eje seleccionado, se procede a calcular el factor de seguridad para el eje hueco de 10mm. de diámetro y 0.1mm de espesor.

$$FS = \frac{16}{\pi * d^3} \left[4 \left(\frac{K_f * M_a}{S_e} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} * T_a}{S_e} \right)^2 + 4 \left(\frac{K_f * M_m}{S_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} * T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$FS = \frac{16}{\pi * 0.01^3} \left[4 \left(\frac{1 * 63.08 * 10^{-3}}{154929146.4} \right)^2 + 3 \left(\frac{1 * 112.85 * 10^{-3}}{250000000} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$FS = 174$$

5.5.2.9 Cálculo de resistencia a flexión máxima.

Según el diagrama de momento flector, el punto crítico se da a un valor $M_a = 63.08$ Nmm. Para una condición de máxima carga, la deflexión máxima viene dada por la ecuación siguiente:

$$\frac{M_a * D/2}{I_x} \leq \frac{\sigma_f}{FS}$$

También se sabe que:

$$I_x = \frac{\pi}{64} * (D^4 - d^4)$$

$$I_x = \frac{\pi}{64} * (0.01^4 - 0.0098^4)$$

$$I_x = 3.81 * 10^{-11} m^4$$

Reemplazando los valores del esfuerzo de fluencia igual al esfuerzo permisible y con un factor de seguridad de 3, se valida la condición siguiente:

$$\frac{0.063 * 0.01/2}{3.81 * 10^{-11}} \leq \frac{250 * 10^6}{174}$$

$$1.086 * 10^6 Pa. \leq 1.44 * 10^6 Pa.$$

5.5.2.10 Cálculo de la máxima deflexión en el eje.

La verificación de deflexión máxima es muy importante para garantizar la alineación y evitar vibraciones

Para obtener la deflexión máxima en el eje, se tiene como dato el módulo de elasticidad del acero ASTM A36 $E=200$ GPa, distancia del voladizo $L1=94$ mm más $L2=82.25$ mm y el momento de inercia $I_x=3.81*10^{-11} mm^4$, con los datos mencionados se obtiene la deflexión

máxima por el método de superposición y considerando el diagrama de la figura 32, queda de la siguiente manera:

$$\delta_{max} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$$

$$\delta_{max} = \frac{F_V/2 * (L_2 + L_1)^3}{3 * E * I_x} + \frac{\frac{F_V}{2} * L_2^2}{6 * E * I_x} (L_2 - 3(L_2 + L_1)) + \frac{q * (L_2 + L_1)^4}{8 * E * I_x}$$

$$\delta_{max} = \frac{0.215 * (0.08225 + 0.094)^3}{3 * 200 * 10^9 * 3.81 * 10^{-11}} + \frac{0.215 * 0.08225^2}{6 * 200 * 10^9 * 3.81 * 10^{-11}} (0.08225 - 3(0.08225 + 0.094)) + \frac{0.483 * (0.08225 + 0.094)^4}{8 * 200 * 10^9 * 3.81 * 10^{-11}}$$

$$\delta_{max} = 0.045mm$$

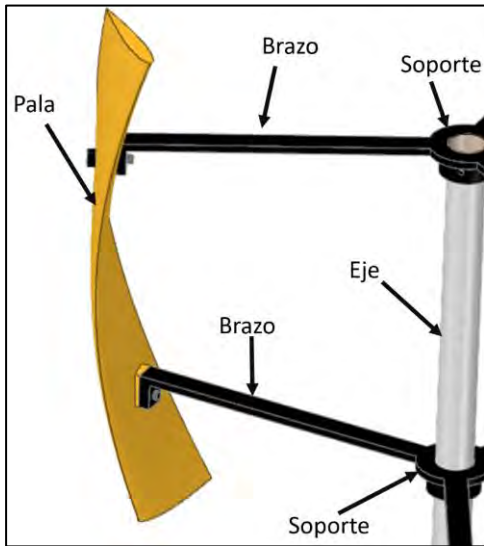
5.6 Cálculo de deflexión en los brazos.

Según el modelo 3d propuesto, el aerogenerador tiene 6 brazos que une la pala con el eje de la turbina y estas estarán sometidas a flexión debido al peso de la pala y al peso de la misma.

La figura 34, muestra la configuración geométrica del brazo.

Figura 34.

Configuración geométrica del brazo



Nota: Elaboración propia

Como dato se tiene el material del brazo que es PLA y sección transversal 6 mm x 2 mm. Asimismo. para el presente análisis de deflexión, se asume una unión empotrada en el borde que va unido al soporte. Dicho ello, se calcula la longitud del brazo de la siguiente manera.

$$L_{brazo} = \frac{D}{2} - \frac{d_{soporte}}{2} = \frac{185}{2} - \frac{30}{2} = 77.5mm.$$

Donde:

L_{brazo} : longitud del brazo (mm).

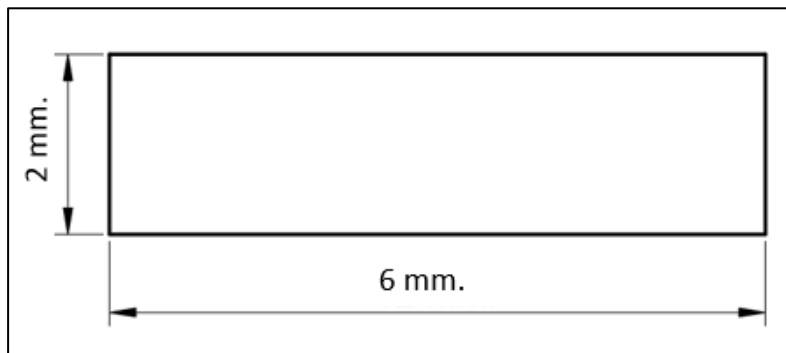
D : Diámetro de la turbina (mm).

$d_{soporte}$: Diámetro del soporte (mm).

La figura 35, representa el esquema del brazo como una viga voladiza en la cual actúa el peso de la pala, tornillos y el mismo peso de la barra.

Figura 35.

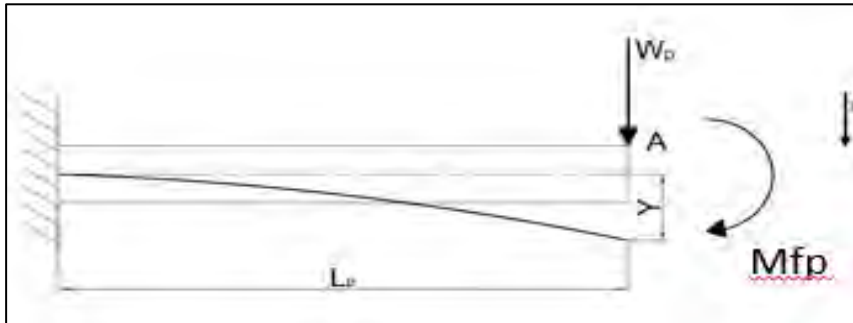
Esquema de la sección transversal del brazo.



Nota: Elaboración propia.

Figura 36.

Esquema del brazo sometido a cargas por el peso de la pala y a flexión.



Nota: Elaboración propia

De la figura 36, se tiene el momento flector que es generado por el peso de la barra W_b =1.3g. y se representa de la siguiente manera:

$$M_{fp} = W_b * \frac{L_b}{2} = \left(0.0013Kg * \frac{9.81m}{s^2} \right) * \frac{80mm}{2} = 0.51Nmm.$$

Donde:

W_b : Peso del brazo (N).

L_b : Longitud del brazo (mm).

También se sabe que la fuerza transversal W_y es la suma del peso de la pala y de la barra.

$$W_y = W_{pala} + W_b$$

$$W_y = 0.01133Kg * 9.81m/s^2 + 0.0013Kg * 9.81m/s^2$$

$$W_y = 0.01263N$$

Donde:

W_y : Fuerza transversal (N).

W_{pala} : Peso de la pala (N).

W_b : Peso del brazo (N).

De la figura 36 se tiene un desplazamiento total en el puto A que es igual al desplazamiento generado por la fuerza transversal más el desplazamiento generado por el momento flector.

$$Y = Y_1 + Y_2$$

Donde:

Y: Desplazamiento del brazo (mm).

Y_1 : Desplazamiento generado por la fuerza transversal (mm).

Y_2 : Desplazamiento generado por el momento flector (mm).

El desplazamiento Y_1 y Y_2 queda de la siguiente manera:

$$Y_1 = \frac{W_y}{6 * E_{PLA} * I_{brazo}} * (x^3 - 3Lx^2)$$

$$Y_2 = \frac{M_{fp}}{2 * E_{PLA} * I_{brazo}} * x^2$$

Se sabe que $E_{PLA}=3.3*10^3$ MPa., la inercia $I_{brazo}=b \times h^3/12 = 6 \times 2^3 / 12 = 4\text{mm}^4$.

Con los valores calculados previamente, se procede a calcular Y_1 y Y_2 :

$$Y_1 = \frac{W_y}{6 * E_{PLA} * I_{brazo}} * (80 \text{ mm}^3 - 3 * 80 \text{ mm}^2)$$

$$Y_1 = -2.55 * 10^{-5} \text{ mm.}$$

$$Y_2 = \frac{M_{fp}}{2 * E_{PLA} * I_{brazo}} * 80 \text{ mm}^2$$

$$Y_2 = 1.55 * 10^{-3}$$

Entonces, el valor de Y será igual a:

$$Y = Y_1 + Y_2 = 0.00155 \text{ mm}$$

7.7.3. Selección de rodamiento.

Rodamientos cerámico rígidos de bolas serie **6800 (ZrO2)** para eje de 10mm.

$$P_0 = F_r + 0.6F_a$$

$$P_0 = 3.03N + 0.6 * 1.65N$$

$$P_0 = 4.02N.$$

Donde:

P_0 : Carga estática equivalente.

F_r : Carga radial.

F_a : Carga axial.

Según catálogo, la capacidad de carga estática y dinámica es 0.253kN y 0.515KN, ver anexo 2.

La vida nominal del rodamiento, se estima mediante la siguiente ecuación.

$$L_{10h} = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \frac{10^6}{60 \cdot n}$$

Con $C = 515N$, $P = 4.02N$ y $n = 600$ rpm, $L_{10h} = 5.84 * 10^7h$.

CAPITULO VI

ESPECIFICACIONES TECNICAS

6.1 Especificaciones Técnicas de Material.

6.1.1 Generalidades

El presente capítulo establece las especificaciones técnicas de los materiales empleados en la fabricación de la turbina eólica de eje vertical tipo Darrieus helicoidal. La selección de materiales se realizó considerando la escala reducida del prototipo, la baja inercia requerida para el arranque, la resistencia mecánica frente a cargas aerodinámicas, la facilidad de manufactura, la disponibilidad local y la necesidad de obtener superficies geométricamente estables para el análisis aerodinámico.

El rotor considerado posee diámetro $D = 0.185$ m, altura $H = 0.185$ m, tres palas helicoidales con perfil NACA 0015, cuerda evaluada de 0.03 m y 0.04 m, y ángulo helicoidal de 60 grados. La turbina fue concebida para velocidades de ensayo de 3, 4, 5 y 6 m/s, y para una condición crítica de diseño de 11 m/s. En consecuencia, los materiales deben garantizar rigidez suficiente, estabilidad dimensional, bajo peso y resistencia a vibraciones durante el funcionamiento del conjunto.

6.1.2 Criterios técnicos para la selección de materiales

Los criterios de selección se definieron en función de la finalidad experimental del prototipo. Al tratarse de una turbina de escala reducida, el peso de cada componente influye directamente en el momento de inercia del rotor, en el tiempo de aceleración y en la sensibilidad de las mediciones de torque. Por esta razón, los componentes rotativos deben fabricarse con materiales ligeros y suficientemente rígidos, mientras que los elementos de soporte deben priorizar la estabilidad geométrica y la alineación del eje.

- Disponible del material en el mercado local y facilidad de reposición ante fallas o modificaciones del diseño.
- Compatibilidad con procesos de manufactura aditiva, mecanizado convencional, mecanizado CNC y ensamblaje mediante uniones atornilladas.
- Baja masa específica en los componentes rotativos, con el fin de reducir el momento de inercia y favorecer el arranque del rotor.

- Resistencia mecánica suficiente frente a cargas normales, tangenciales, torsionales y de flexión generadas por el flujo de aire.
- Estabilidad dimensional frente a vibraciones, cambios de temperatura moderados y manipulación durante el montaje experimental.
- Buena calidad superficial en las palas, debido a que el acabado aerodinámico influye en la capa límite, el arrastre y la repetibilidad de los ensayos.

6.1.3 Resumen de materiales seleccionados

Tabla 18.

Materiales seleccionados según cada componente.

Componente	Material especificado	Justificación técnica
Palas helicoidales	Resina epóxica y madera pino	Perfil NACA 0015, geometría helicoidal, alta definición superficial, baja deformación y facilidad de postcurado.
Brazos de unión	PLA de alta resistencia mecánica	Permite fabricar geometría compleja mediante impresión 3D FDM, con bajo peso y rigidez suficiente para escala de laboratorio.
Eje central	Acero ASTM A36, tubo cilíndrico hueco	Aporta resistencia a flexión y torsión, buena disponibilidad y facilidad de corte
Bancada tipo chumacera	Aluminio	Permite alojamiento preciso de rodamientos, bajo peso, buena maquinabilidad y resistencia a corrosión.
Estructura soporte	Perfil angular de aluminio L10 x 10 x 1 mm	Ligero, estable, de fácil ensamblaje y adecuado para instalación dentro del túnel de viento.
Rodamientos	Rodamientos cerámicos Si ₃ N ₄ o rígidos de bolas de baja fricción	Reducen pérdidas mecánicas, permiten giro suave y mejoran la sensibilidad de medición experimental.
Freno Prony	PLA para cuerpo, zapata y brazo de reacción; tornillería metálica	Permite control de fricción y medición de torque con baja carga en un prototipo de laboratorio.
Tornillería	Acero clase 8.8, principalmente M2.	Asegura los brazos, soportes y elementos de unión sin requerir soldadura.
Adhesivos y acabado	Adhesivo epóxica, lija fina y, opcionalmente, sellador superficial	Se emplean para unión de segmentos, corrección superficial y protección de las palas.

Nota: Fuente propia

6.1.4 Especificaciones del material de las palas helicoidales

Las palas constituyen el componente aerodinámico principal del rotor; por ello, el material debe conservar con precisión la geometría NACA 0015 y la torsión helicoidal de 60

grados. Para el prototipo se especifica el uso de resina epóxica y madera, procesada mediante impresión 3D de resina y mediante mecanizado.

Tabla 19.

Propiedades mecánicas de a resina epóxica.

Propiedad	Especificación	Criterio de aceptación
Densidad	1150 kg/m ³	Valor de referencia usado para el material de pala.
Módulo de elasticidad longitudinal	3100 MPa	Rigidez suficiente para evitar deformaciones perceptibles en la escala del prototipo.
Resistencia a la tracción	72 MPa	Adecuada para soportar esfuerzos aerodinámicos y manipulación durante el montaje.

Nota: Tomado de “Propiedades de la resina epóxica” Monterrey & Zelandia, (1978)

Tabla 20.

Propiedades mecánicas y físicas de la madera pino.

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad	1150	Kg/m ³ .
Módulo de elasticidad longitudinal	3100	MPa.
Resistencia a la tracción	72.0	MPa

Nota: Tomado de “Propiedades de la resina epóxica” Monterrey & Zelandia, (1978)

Para asegurar uniformidad aerodinámica, las tres palas deben fabricarse a partir del mismo archivo CAD validado. Después de la impresión. postcurado, y el mecanizado, cada pala debe pesarse y compararse con las demás. La diferencia de masa entre palas no debe exceder el 3 %; si se supera este valor.

6.1.5 Especificaciones del material de brazos, soportes y acoples

Los brazos de unión conectan las palas helicoidales con el eje central y transmiten las cargas aerodinámicas hacia el conjunto rotativo. Debido a la geometría reducida del prototipo y a la necesidad de fabricar alojamientos precisos, se especifica PLA de alta resistencia mecánica mediante impresión 3D. Este material permite obtener piezas ligeras, económicas y fácilmente modificables ante cambios de diseño.

Tabla 21.*Propiedades mecánicas del PLA.*

Propiedad	Especificación	Criterio técnico
Densidad	1240 kg/m ³	Control del peso del rotor y reducción de inercia.
Resistencia a la tracción	40 a 70 MPa	Suficiente para brazos de pequeña sección sometidos a cargas bajas.
Módulo de elasticidad	3.3 a 3.6 GPa	Rigidez adecuada para limitar deflexión durante el ensayo.
Elongación	3 a 6 %	Comportamiento rígido; evitar impactos o esfuerzos concentrados.

Nota: Tomado de “Propiedades del PLA” (Universidad Jaume I., 2022).

En las zonas de unión atornillada se recomienda emplear arandelas planas o insertos metálicos para distribuir la presión de apriete y evitar aplastamiento del PLA. Los agujeros impresos deben verificarse con broca o escariador, debido a que la contracción del material y la resolución de la impresora pueden reducir el diámetro real.

6.1.6 Especificaciones del eje central

El eje central se especifica como un tubo cilíndrico hueco de acero ASTM A36, con diámetro exterior de 10mm. Su función es soportar el rotor, transmitir el torque hacia el freno Prony y mantener la coaxialidad con los rodamientos. El material seleccionado ofrece buena disponibilidad local, rigidez elevada y facilidad de mecanizado, corte y perforado.

Tabla 22.*Propiedades mecánicas y físicas del acero ASTM A36.*

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad	7850	Kg/m ³ .
Módulo de elasticidad	200	GPa.
Resistencia a la fluencia (Sy)	250	MPa
Resistencia a la tracción (Sut)	400-500	MPa.

Nota: Tomado de “Diseño en ingeniería mecánica” Shigley, (1990).

Antes del montaje debe verificarse la rectitud del eje mediante giro sobre prismas o sobre los propios rodamientos. La excentricidad radial recomendada en la zona de giro no debe superar

0.10 a 0.20 mm para evitar vibraciones apreciables en el túnel de viento. Si se mecanizan planos para prisioneros, estos deben ubicarse fuera de la zona de contacto con los rodamientos.

6.1.7 Especificaciones de rodamientos y bancada

El sistema de apoyo se compone de rodamientos de baja fricción instalados en una bancada tipo chumacera fabricada en aluminio. El objetivo principal es reducir pérdidas mecánicas, mantener el eje alineado y permitir que el torque medido en el freno Prony corresponda principalmente al comportamiento aerodinámico del rotor.

Tabla 23.

Propiedades mecánicas del aluminio y rodamientos.

Elemento	Especificación	Criterio
Rodamientos	Cerámicos ZrO ₂	Minimizan fricción y corrosión.
Diámetro interior	10 mm	Compatible con el eje especificado.
Serie recomendada	6200 o equivalente de diámetro interior 10 mm; verificar dimensiones reales del rodamiento adquirido	Evita incompatibilidades entre eje, alojamiento y rodamiento.
Carga dinámica de referencia	$C = 0.515 \text{ N}$	Dato de selección empleado en la tesis.
Carga estática equivalente	$P = 0.253 \text{ kN}$	Dato para estimación de vida del rodamiento.
Velocidad de referencia	600 rpm	Condición usada para selección.
Material de bancada	Aluminio mecanizable	Ligero, estable y de buena maquinabilidad.

Nota: Fuente propia

6.1.8 Especificaciones de la estructura soporte

La estructura soporte permite fijar la turbina dentro de la cámara de pruebas del túnel de viento sin interferir significativamente con el flujo. Se especifican perfiles angulares de aluminio L10 x 10 mm con espesor de 1 mm, unidos mediante tornillería. Este material fue seleccionado por su bajo peso, facilidad de corte y perforado, y resistencia suficiente frente a las cargas reducidas del prototipo.

Tabla 24.*Propiedades mecánicas del aluminio.*

Parámetro	Especificación	Justificación
Material	Aluminio	Estructura ligera para montaje interno en túnel de viento.
Perfil	Angular L10 x 10 x 1 mm	Dimensiones establecidas para la estructura soporte.
Densidad	2770 kg/m ³	Menor peso respecto a acero.
Módulo de elasticidad	71.7 GPa	Rigidez adecuada para estructura secundaria.
Resistencia a fluencia	70 MPa	Referencia para verificación estructural.
Resistencia a tracción	90 MPa	Referencia mecánica del material.
Esfuerzo máximo por simulación	0.93 MPa	Muy inferior al límite de fluencia indicado.
Método de unión	Tornillos, tuercas y arandelas	Permite desmontaje y reajuste del montaje experimental.
Requisito de rigidez	Sin desplazamiento visible durante operación	Evita variación de posición del rotor durante mediciones.

Nota: Fuente propia.

6.1.9 Especificaciones del dispositivo de freno Prony

El freno Prony es el dispositivo de carga empleado para estimar el torque dinámico del rotor mediante fricción controlada. Se especifica la fabricación del cuerpo principal en PLA, complementado con tornillo de compresión, brazo de reacción y superficie de fricción. Al tratarse de mediciones de baja potencia, el material polimérico es adecuado siempre que se evite calentamiento excesivo por fricción prolongada.

- El cuerpo del freno debe presentar rigidez suficiente para que el tornillo de compresión no deforme la geometría durante la medición.
- La superficie de contacto debe ser regular y reemplazable, de modo que el coeficiente de fricción se mantenga estable entre repeticiones.
- El brazo de reacción debe tener longitud conocida y medible, ya que el torque se calcula a partir de la fuerza aplicada y el brazo efectivo.
- Las piezas impresas deben revisarse después de cada serie de ensayos para descartar desgaste, deformación o ablandamiento por temperatura.

- El sistema debe permitir aplicar carga gradualmente para evitar bloqueo brusco del rotor y errores en la lectura de velocidad angular.

6.1.10 Especificaciones de uniones, adhesivos y acabado superficial

Las uniones del prototipo se resuelven mediante tornillería, prisioneros y adhesivo bicomponente en las palas segmentadas. Las uniones deben asegurar posición geométrica repetible, desmontaje cuando sea necesario y ausencia de holguras que generen vibraciones o pérdidas mecánicas.

Tabla 25.

Propiedades mecánicas de las uniones atornilladas, adhesivos y acabado superficial.

Elemento	Especificación	Criterio de control
Tornillos de brazos	M2 clase 8.8	Verificados para carga cortante de diseño.
Esfuerzo cortante de referencia	99 MPa < 220 MPa	Condición segura según cálculo de tesis.
Par de apriete	Aplicar apriete controlado; si se usa 2.8 N.m, verificar previamente que no deforme PLA	El PLA puede aplastarse por sobre apriete.
Adhesivo de palas	Epóxica bicomponente	Unión de segmentos impresos y relleno de micro holguras.
Preparación superficial	Lijado suave y limpieza antes de unir	Mejora adherencia.
Acabado aerodinámico	Lijado progresivo, eliminación de escalones y rebabas	Disminuye perturbaciones en el flujo.
Inspección final	Sin grietas, delaminación, rebabas ni holguras	Asegura repetibilidad experimental.

Fuente: Elaboración propia.

6.2 Especificaciones Técnicas de Fabricación

La fabricación se organiza en etapas: generación de la geometría aerodinámica, modelado CAD, preparación para manufactura aditiva, impresión 3D, mecanizado de elementos metálicos, fabricación de bancada y estructura, postproceso, ensamblaje, alineación e inspección final.

El objetivo principal del proceso de fabricación es garantizar que el prototipo conserve la similitud geométrica definida en el diseño, que las tres palas presenten igualdad dimensional y

que las pérdidas mecánicas del sistema sean lo suficientemente bajas para permitir mediciones confiables de torque, potencia y coeficiente de potencia.

6.2.1 *Flujo general de fabricación*

- Generación de coordenadas del perfil NACA 0015 para cuerdas de 0.03 m y 0.04 m.
- Escalamiento del perfil y generación de la geometría 3D helicoidal con ángulo de 60 grados.
- Modelado CAD de palas, brazos, soportes, acoples, bancada, estructura y freno Prony.
- Revisión de interferencias, verificación de ensamblaje y exportación de archivos STL, STEP o DXF según proceso.
- Preparación de archivos de impresión 3D en software laminador para resina y para FDM.
- Fabricación de palas mediante impresión 3D de resina, segmentadas si el volumen de impresión lo requiere. Así, mismo la el mecanizado en madera.
- Fabricación de brazos, soportes y freno Prony mediante impresión 3D FDM en PLA.
- Corte, perforado y mecanizado del eje central de acero ASTM A36.
- Mecanizado CNC o convencional de la bancada tipo chumacera en aluminio.
- Corte, perforado, desbarbado y armado de la estructura soporte en perfiles angulares de aluminio.
- Postproceso: curado, lijado, limpieza, escariado de agujeros, eliminación de rebabas y control dimensional.
- Ensamblaje del rotor, alineación del eje, montaje de rodamientos, instalación del freno Prony y verificación de giro libre.
- Balanceo estático y liberación del conjunto para ensayos en túnel de viento.

6.2.2 *Equipos, Herramientas e Instrumentos Requeridos*

Tabla 26.

Equipos e instrumentos requeridos.

Equipo o instrumento	Especificación mínima	Uso principal
Computadora de diseño	Estación con software CAD, Qblade, Matlab y software laminador	Generación de perfil, calculo, modelado y preparación de fabricación.
Impresora 3D de resina	Tipo SLA, DLP, LCD o MSLA;	Fabricación de palas helicoidales de

	resolución $XY \leq 0.05$ mm recomendada; altura útil ≥ 185 mm o impresión segmentada	alta calidad superficial.
Equipo de lavado y curado UV	Lavado con alcohol isopropílico o solvente compatible y cámara UV	Postproceso de piezas de resina.
Impresora 3D FDM/FFF	Boquilla 0.4 mm; cama caliente; volumen mínimo 200 x 200 x 180 mm recomendado	Fabricación de brazos, acoples y freno Prony en PLA.
Fresadora CNC de 3 ejes o router CNC	Mesa rígida, mordazas, spindle y herramientas de pequeño diámetro	Mecanizado de bancadas, alojamientos y placas de soporte.
Taladro de banco	Mandril de precisión y brocas métricas	Perforado de perfiles de aluminio, eje y piezas auxiliares.
Torno o mini torno	Sujeción para eje de 10 mm	Refrentado, corte y acondicionamiento del eje.
Herramientas manuales	Limas, lijas, escariadores, llaves Allen, destornilladores y alicates	Ajuste, acabado y ensamblaje.
Instrumentos de medición	Vernier, balanza digital, escuadra y transportador	Control dimensional, balanceo y verificación de alineación.
Elementos de seguridad	Gafas, guantes, mascarilla, extractor, protección auditiva	Seguridad durante impresión, lijado y mecanizado.

Fuente: Elaboración propia.

6.2.3 Preparación del modelo CAD de las palas

La pala helicoidal se genera a partir del perfil NACA 0015, cuyas coordenadas normalizadas se escalan según la cuerda seleccionada. Para la configuración de ensayo principal se usa $c = 0.04$ m, con espesor máximo de 0.006 m. El perfil se distribuye en secciones a lo largo de la altura $H = 0.185$ m, aplicando una rotación progresiva hasta completar el ángulo helicoidal de 60 grados.

- Definir el sistema de coordenadas del rotor con el eje Z coincidente con el eje de rotación.
- Importar o generar las coordenadas del perfil NACA 0015 en dos dimensiones.
- Escalar las coordenadas a la cuerda seleccionada, conservando simetría respecto a la línea media.

- Crear al menos seis secciones de control a lo largo de la altura para suavizar la superficie helicoidal.
- Aplicar rotación progresiva hasta alcanzar 60 grados entre la base y el extremo superior.
- Generar superficie por barrido, evitando discontinuidades en borde de ataque y borde de salida.
- Cerrar la geometría como solido imprimible y revisar espesor mínimo, interferencias y orientación.
- Exportar en formato STL de alta resolución para impresión 3D y en formato STEP para archivo maestro de diseño.

En el archivo CAD se debe conservar una versión paramétrica editable, de modo que el investigador pueda modificar cuerda, altura, radio o ángulo helicoidal sin reconstruir completamente el modelo. Cada modificación geométrica debe registrarse con fecha, versión y parámetro cambiado.

6.2.4 Fabricación de palas helicoidales.

Las palas se fabrican mediante manufactura aditiva con resina por la necesidad de reproducir una superficie aerodinámica continua y de mayor definición que la obtenida con impresión convencional. Dado que la altura de cada pala es de 185 mm, la impresión puede realizarse en una sola pieza si el volumen útil de la impresora lo permite; en caso contrario, se recomienda segmentar cada pala en módulos de 60 a 80 mm, tal como se propone en la tesis.

Tabla 27.

Equipos e instrumentos requeridos.

Parámetro	Especificación recomendada	Justificación
Tipo de impresora	Fotopolimerización SLA (Utiliza un rayo láser que dibuja la forma de la pieza sobre la resina punto por punto)	Seleccionar equipo con resolución suficiente para conservar borde de ataque.
Altura de capa	0.05 a 0.10 mm recomendada; máximo	Menor capa mejora acabado

	0.15 a 0.20 mm si se prioriza tiempo de fabricación	aerodinámico y reduce lijado.
Orientación	Vertical o inclinada entre 20 y 35 grados según volumen de impresión	Reduce marcas en la superficie funcional y facilita drenaje.
Soportes	Densidad moderada, puntos de contacto pequeños, ubicados preferentemente fuera del borde de ataque	Evita defectos en zona aerodinámica critica.
Segmentación	60 a 80 mm por modulo si no entra la pala completa	Permite controlar deformación y evitar soportes excesivos.
Espesor de pared	Solido o pared ≥ 1.5 mm con relleno interno si se aligera	Evitar piezas frágiles o con cavidades sin drenaje.
Lavado	Alcohol isopropílico o solvente compatible	Eliminar resina no curada antes del postcurado.
Postcurado UV	Tiempo según ficha técnica de la resina	Garantiza rigidez final y estabilidad dimensional.
Acabado	Lijado fino, eliminación de soportes y sellado opcional	Mejorar continuidad superficial y reducir arrastre.

Fuente: Elaboración propia.

El postproceso de las palas se debe ejecutar con cuidado para no alterar la geometría del perfil NACA 0015. La eliminación de soportes debe realizarse con alicate de corte fino y lijado progresivo. No se debe redondear excesivamente el borde de salida, ya que ello modifica el espesor efectivo del perfil y puede cambiar el comportamiento aerodinámico a bajo número de Reynolds.

Figura 37.

Palas helicoidales fabricadas en resina epóxica.



Nota: Elaboración propia

6.2.5 Ensamblaje de palas segmentadas

Cuando la pala se imprime en segmentos, la unión debe conservar la continuidad geométrica de la superficie helicoidal. Para ello se recomienda incluir pines de centrado, alojamientos tipo macho-hembra o superficies planas de referencia en el modelo CAD. El adhesivo debe aplicarse en capa delgada para evitar acumulaciones que generen excentricidad o escalones en la superficie.

- Presentar los segmentos en seco y verificar que no exista interferencia.
- Alinear los bordes de ataque y salida usando una plantilla o guía impresa.
- Aplicar adhesivo epóxica bicomponente en capa uniforme.
- Presionar los segmentos hasta eliminar holgura y retirar exceso de adhesivo.
- Dejar curar el adhesivo durante el tiempo recomendado por el fabricante.
- Lijar la zona de unión hasta que no exista escalón perceptible al tacto.
- Verificar masa, rectitud, cuerda y continuidad helicoidal antes del montaje en el rotor.

6.2.6 Fabricación de brazos, soportes y freno Prony mediante impresión 3D y mecanizado.

Los brazos, soportes, acoples y el cuerpo del freno Prony se fabrican mediante impresión 3D en PLA. Este proceso es adecuado para piezas de geometría compleja, alojamientos pequeños y prototipos de bajo costo. La orientación de impresión debe definirse de manera que las líneas de deposición coincidan con la dirección principal de esfuerzo.

Tabla 28.

Parámetros de fabricación de brazos y freno prony.

Parámetro FDM	Especificación	Criterio técnico
Material	PLA de alta resistencia	Secar el filamento si presenta humedad o burbujeo.
Boquilla	0.4 mm	Compatible con piezas pequeñas y buen acabado.
Altura de capa	0.16 a 0.20 mm	Equilibrio entre resistencia, tiempo y precisión.
Temperatura de boquilla	200 a 215 grados C, ajustar según filamento	Asegurar adhesión entre capas.
Temperatura de cama	55 a 65 grados C	Reducir alabeo en piezas delgadas.
Relleno para brazos	60 a 100 %	Mayor rigidez y resistencia en flexión.
Perímetros	4 perímetros externos mínimo	Mejora resistencia cerca de agujeros.
Patrón de relleno	Rectilíneo, cubico	Evita concentraciones de esfuerzo.
Orientación	Longitud del brazo paralela a la dirección de deposición principal	Disminuye riesgo de rotura por delaminación.
Contorno exterior de freno prony	2D perfilado	Fresa plana de 4 mm

Fuente: Elaboración propia.

Para piezas sometidas a apriete, como soportes o acoples, se recomienda aumentar perímetros y usar arandelas. En piezas del freno Prony debe evitarse el contacto prolongado que genere calentamiento. Si se detecta ablandamiento del PLA, debe reducirse la carga de fricción por ensayo o incorporarse una superficie de contacto reemplazable de material resistente al calor.

Figura 38.

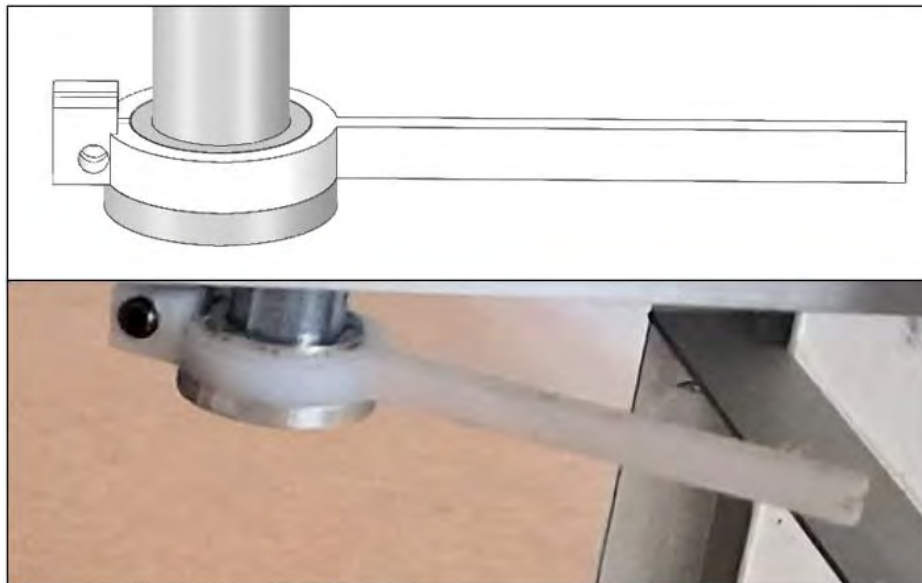
Brazos fabricados en material PLA.



Nota: Elaboración propia

Figura 39.

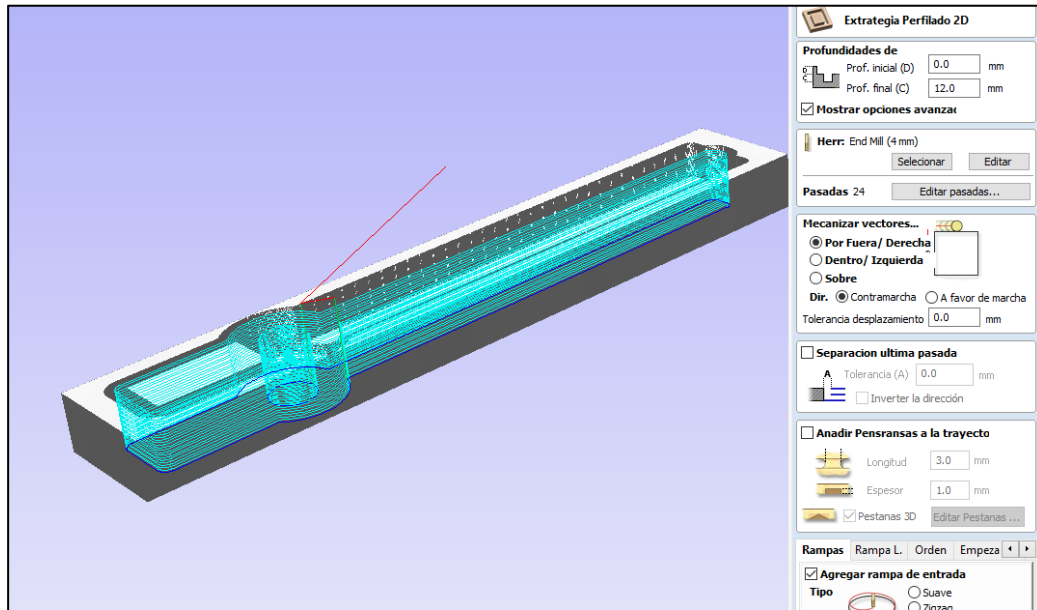
fabricación del dispositivo freno prony.



Nota: Elaboración propia

Figura 40.

Generación de las trayectorias de mecanizado freno prony, con una fresa de 4mm.



Nota: Elaboración propia

6.2.7 Mecanizado CNC de bancada tipo chumacera

La bancada tipo chumacera tiene la función de alojar los rodamientos y fijarlos a la estructura soporte. Puede fabricarse en aluminio mediante fresadora CNC de tres ejes, router CNC rígido o mecanizado convencional. Debido a que la precisión del alojamiento afecta directamente la fricción del eje, esta pieza debe recibir el mayor control dimensional del conjunto.

La estrategia de mecanizado debe preparar primero las caras de referencia, luego el alojamiento del rodamiento y finalmente los agujeros de fijación. El cero de pieza se recomienda ubicar en el centro del alojamiento del rodamiento, sobre la cara superior, para facilitar interpolación circular y simetría de taladros.

Tabla 29.*Parámetros de fabricación de bancada tipo chumacera.*

Operación CNC	Trayectoria CAM	Herramienta	Parámetros guía	Objetivo
Planeado de cara superior	Fase milling o ráster paralelo	Fresa plana de 4mm	Profundidad 0.2 a 0.5 mm; solape 50 a 60 %	Genera referencia plana para el rodamiento.
Contorno exterior	2D contour rough finish	Fresa plana de 4 mm	Dejar 0.10 mm de sobre material y pasada final ligera	Define forma final sin rebabas excesivas.
Alojamiento de rodamiento	Interpolación circular o bolsillo helicoidal	Fresa de 4 mm; acabado con pasada circular	Medir diámetro real del rodamiento; mecanizar ajuste suave sin holgura perceptible	Asegura concentricidad del eje.
Pasada final	2D contour finish	Misma herramienta de contorno	Avance reducido y refrigeración por aire o lubricante ligero	Mejora acabado y precisión.

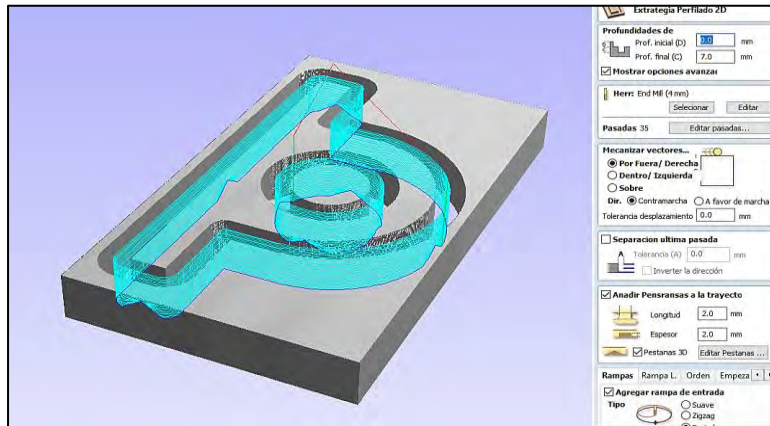
Fuente: Elaboración propia.

Las velocidades de avance y giro deben ajustarse al equipo disponible, rigidez de sujeción y diámetro de herramienta. En una fresadora de sobremesa se recomienda iniciar con avances conservadores, profundidad de pasada baja y lubricación ligera para evitar vibración.

Figura 41.*Fabricación de bancada tipo chumacera en material aluminio.**Nota: Elaboración propia*

Figura 42.

Generación de las trayectorias de mecanizado con una fresa de 4mm.



Nota: Elaboración propia

6.2.8 Fabricación de estructura soporte en aluminio

La estructura soporte se fabricó mediante perfiles angulares L10×10 mm con espesor de 1 mm en aluminio. Su peso reducido permite mantener bajo el momento de inercia de la plataforma y facilita el transporte dentro del túnel de viento, se utilizaron tornillos como elementos de unión entre perfiles. Asimismo, cabe mencionar que el diseño de la estructura soporte se realizó mediante simulación por elementos finitos la cual se muestra en la figura 39, en la cual el esfuerzo máximo presente es de 0.93MPa.

Tabla 30.

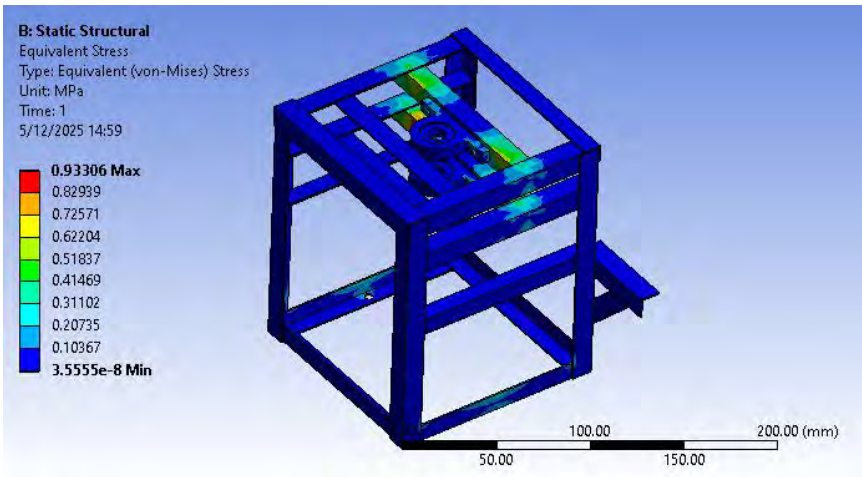
Parámetros de fabricación de estructura soporte.

Etap	Operación	Equipo	Especificación de proceso	Inspección
1	Trazado	Regla, escuadra y marcador fino	Marcar longitudes y centros de perforación según plano.	Coincidencia con plantilla.
2	Corte	Sierra manual	Cortar perfiles evitando deformación del ala del angular.	Longitud +/- 0.5mm.
3	Perforado	Taladro de banco	Usar broca centradora y luego diámetro final.	Agujeros alineados.
4	Desbarbado	Lima fina	Eliminar rebabas internas y externas.	Sin aristas cortantes.
5	Prearmado	Tornillos	Armar sin apriete final para	Verificar

			permitir ajuste.	escuadras.
6	Alineación final	Escuadra	Alinear eje vertical y apoyos de rodamientos.	Eje sin inclinación visible.
7	Apriete	destornillador controlado	Apretar gradualmente.	Estructura rígida sin torsión.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 43.
Simulación computacional de la estructura soporte.



Nota: Elaboración propia

Figura 44.
Estructura soporte fabricado en aluminio.



Nota: Elaboración propia

6.2.9 Ensamblaje del rotor

El rotor debe ensamblarse con una plantilla que asegure distribución angular de 120 grados entre palas y radio constante $R = 0.0925$ m. El ensamblaje incorrecto produce desbalance, vibración y errores en la curva C_p - TSR. Se recomienda armar primero el subconjunto eje-soportes-brazos y luego incorporar las palas.

- Colocar el eje central en posición vertical sobre una base de montaje o plantilla.
- Instalar los soportes superior e inferior y fijarlos temporalmente con prisioneros o tornillos.
- Ubicar los seis brazos de unión, verificando que cada par superior e inferior corresponda a una misma pala.
- Ajustar la separación radial hasta que el borde medio de cada pala se ubique en el radio de diseño.
- Distribuir las tres palas a 120 grados usando transportador, plantilla impresa o referencia CAD.
- Fijar las palas a los brazos sin apriete final y verificar continuidad helicoidal de 60 grados.
- Apretar tornillos de manera gradual para evitar torsión local del PLA o deformación de la pala.
- Girar manualmente el conjunto y verificar que no exista interferencia con soporte, bancada o freno Prony.

6.2.10 Montaje de rodamientos, bancada y estructura soporte

El montaje de rodamientos debe realizarse sin golpes directos sobre las pistas. La fuerza de inserción debe aplicarse sobre la pista correspondiente: si el rodamiento entra en el alojamiento, la fuerza debe aplicarse sobre la pista exterior; si se instala sobre el eje, sobre la pista interior. El uso incorrecto de carga durante el montaje puede dañar el rodamiento y aumentar las pérdidas por fricción.

- Verificar que los alojamientos estén limpios, sin virutas ni rebabas.
- Insertar los rodamientos manteniendo perpendicularidad respecto a la bancada.
- Montar el eje y comprobar que gire libremente antes de instalar palas.

- Alinear las dos chumaceras antes del apriete final de la estructura.
- Comprobar que no exista precarga axial excesiva ni rozamiento lateral.
- Instalar el rotor completo y repetir la prueba de giro libre.

6.2.11 Balanceo estático

El balanceo del rotor es indispensable debido a la baja escala del prototipo. Diferencias pequeñas de masa o posición en las palas pueden producir vibración apreciable, reduciendo la calidad de los datos experimentales. El balanceo se realiza antes de instalar el freno Prony y antes de exponer el conjunto al flujo del túnel.

- Montar el rotor en sus rodamientos sin aplicar carga externa.
- Hacer girar suavemente el rotor y permitir que se detenga por gravedad.
- Marcar la zona que tiende a quedar en la parte inferior.
- Agregar una pequeña masa compensadora en la zona opuesta o retirar material por lijado controlado en la zona pesada.
- Repetir el procedimiento hasta que el rotor no se detenga siempre en la misma posición.
- Verificar que el balanceo no altere la geometría aerodinámica de las palas.

6.2.12 Control dimensional y criterios de aceptación

Tabla 31.

Control dimensional.

Característica	Valor nominal	Tolerancia recomendada	Instrumento
Diámetro del rotor	0.185 m	+/- 0.5 mm	Vernier o plantilla circular
Altura del rotor	0.185 m	+/- 0.5 mm	Vernier o regla metálica
Cuerda de pala	0.04 m en prototipo ensayado	+/- 0.2 mm	Vernier
Distribución angular de palas	120 grados	+/- 1 grado	Transportador o plantilla
Diámetro exterior del eje	10 mm	+/- 0.05 mm en zona de rodamiento	Vernier
Coaxialidad de rodamientos	Eje gira libremente	Sin punto duro ni rozamiento perceptible	Prueba manual de giro
Masa de palas	Tres palas similares	Diferencia $\leq 3\%$	Balanza digital

Acabado de palas	Superficie lisa y continua	Sin rebabas, grietas o escalones visibles	Inspección visual y táctil
------------------	----------------------------	---	----------------------------

Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO VII

ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y COMPORTAMIENTO

El presente capítulo describe el procedimiento experimental, el montaje físico y el análisis estadístico de la turbina eólica tipo Darrieus helicoidal ensayada en túnel de viento.

Las pruebas se realizaron para cuatro velocidades del flujo (3, 4, 5 y 6m/s), registrando las variables fundamentales: velocidad angular (RPM), masa de levantamiento, torque dinámico, potencia mecánica y coeficiente de potencia (C_p). El objetivo principal es evaluar la estabilidad operativa del rotor y determinar su comportamiento aerodinámico bajo diferentes regímenes de viento.

7.1 Montaje Experimental

A continuación, se presentan las fotografías del montaje experimental para las turbinas con cuerda de 0.03 y 0.04m de cuerda utilizadas durante la caracterización aerodinámica de la turbina helicoidal, en las siguientes figuras se muestran las turbinas a ensayar y adicional a esa, se presenta una tercera turbina de diámetro 0.26m, altura 0.26m y una cuerda de 0.04m.

Figura 45.

Turbina Darrieus Helicoidal a 60° , con diámetro 0.185m, altura 0.185 y cuerda 0.03m.



Nota: Elaboración propia

Figura 46.

Turbina Darrieus Helicoidal a 60° , con diámetro 0.185m, altura 0.185 y cuerda 0.04m.



Nota: Elaboración propia

Figura 47.

Turbina Darrieus Helicoidal a 60° , con diámetro 0.260m, altura 0.260 y cuerda 0.04m.



Nota: Elaboración propia

7.2 Procedimiento Experimental

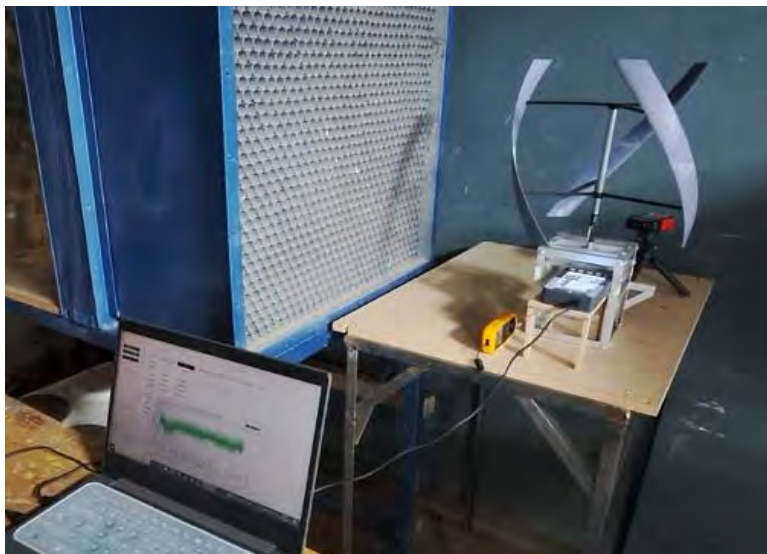
El procedimiento experimental seguido para cada velocidad del viento consistió en lo siguiente:

- Ajustar la velocidad del flujo en el túnel de viento a 3, 4, 5 o 6 m/s, corroborar la medición con un anemómetro.
- Permitir que la turbina alcance un régimen estacionario.
- Medir la velocidad angular (RPM) mediante un tacómetro digital.
- Colocar el sensor de tensión a la altura del freno prony.
- Registrar la tensión capturada por el sensor de tensión y convertirla en torque dinámico.
- Calcular la potencia mecánica generada según la relación: $P = T * \omega$.
- Determinar el coeficiente de potencia (C_p) utilizando: $C_p = P / (0.5 * \rho * A * V^3)$.
- Repetir cada medición diez veces para obtener una base estadística confiable.

Este procedimiento permitió garantizar la repetibilidad de los datos, así como evaluar el comportamiento real del rotor bajo distintos escenarios operativos. En la siguiente figura, se muestra el montaje de los respectivos instrumentos de medición como: Anemómetro, tacómetro laser y un sensor de tensión.

Figura 48.

Desarrollo del experimento e instrumentos usados (tacómetro, anemómetro y sensor de tensión).



Nota: Elaboración propia.

7.2.1 Toma de Datos Experimentales

A continuación, se presentan los datos experimentales registrados para los valores de $c_1=0.03\text{m}$ y $c_2=0.04$ cada velocidad del viento (3, 4, 5 y 6 m/s) según las tablas.

7.2.1.1 Para una cuerda de 0.03m.

Tabla 32.

Toma de datos a $v=4\text{m/s}$, para la turbina con cuerda 3cm y ángulo helicoidal 60° .

LONGITUD DE CUERDA $c_1=0.03\text{ m.}$; ANGULO HELICOIDAL $\psi=60^\circ$								
Ítem	Velocidad del viento (m/s.)	Velocidad angular (RPM)	Fuerza (N)	Torque dinámico (N.mm)	Potencia de turbina (W)	Potencia entregada por el viento (W)	Coefficiente de potencia (C_p)	TSR (λ)
1	$V_2=4.0$	38	0.051	0.6630	0.0026	0.9013	0.0029	0.0920
2	$V_2=4.0$	37	0.052	0.6760	0.0026	0.9013	0.0029	0.0896
3	$V_2=4.0$	38	0.052	0.6760	0.0027	0.9013	0.0030	0.0920
4	$V_2=4.0$	37	0.052	0.6760	0.0026	0.9013	0.0029	0.0896
5	$V_2=4.0$	38	0.052	0.6760	0.0027	0.9013	0.0030	0.0920
6	$V_2=4.0$	38	0.052	0.6760	0.0027	0.9013	0.0030	0.0920
7	$V_2=4.0$	38	0.052	0.6760	0.0027	0.9013	0.0030	0.0920
8	$V_2=4.0$	38	0.052	0.6760	0.0027	0.9013	0.0030	0.0920
9	$V_2=4.0$	38	0.052	0.6760	0.0027	0.9013	0.0030	0.0920
10	$V_2=4.0$	38	0.052	0.6760	0.0027	0.9013	0.0030	0.0920

Fuente: Fuente Propia.

Tabla 33.

Toma de datos a $v=5\text{m/s}$, para la turbina con cuerda 3cm y ángulo helicoidal 60° .

LONGITUD DE CUERDA $c_1=0.03\text{ m.}$; ANGULO HELICOIDAL $\psi=60^\circ$								
Ítem	Velocidad del viento (m/s.)	Velocidad angular (RPM)	Fuerza (N)	Torque dinámico (N.mm)	Potencia de turbina (W)	Potencia entregada por el viento (W)	Coefficiente de potencia (C_p)	TSR (λ)
1	$V_3=5.0$	47	0.096	1.2480	0.0061	1.7604	0.0035	0.0911

2	$V_3=5.0$	46	0.098	1.2740	0.0061	1.7604	0.0035	0.0891
3	$V_3=5.0$	48	0.082	1.0660	0.0054	1.7604	0.0030	0.0930
4	$V_3=5.0$	45	0.098	1.2740	0.0060	1.7604	0.0034	0.0872
5	$V_3=5.0$	47	0.098	1.2740	0.0063	1.7604	0.0036	0.0911
6	$V_3=5.0$	46	0.098	1.2740	0.0061	1.7604	0.0035	0.0891
7	$V_3=5.0$	46	0.098	1.2740	0.0061	1.7604	0.0035	0.0891
8	$V_3=5.0$	47	0.096	1.2480	0.0061	1.7604	0.0035	0.0911
9	$V_3=5.0$	44	0.098	1.2740	0.0059	1.7604	0.0033	0.0852
10	$V_3=5.0$	45	0.098	1.2740	0.0060	1.7604	0.0034	0.0872

Fuente: Fuente Propia.

Tabla 34.

Toma de datos a $v=6\text{m/s}$, para la turbina con cuerda 3cm y ángulo helicoidal 60° .

LONGITUD DE CUERDA $c_1=0.03\text{ m.}$; ANGULO HELICOIDAL $\psi=60^\circ$

Ítem	Velocidad del viento (m/s.)	Velocidad angular (RPM)	Fuerza (N)	Torque dinámico (N.mm)	Potencia de turbina (W)	Potencia entregada por el viento (W)	Coefficiente de potencia (C_p)	TSR (λ)
1	$V_4=6.0$	81	0.130	1.6900	0.0143	3.0421	0.0047	0.1308
2	$V_4=6.0$	80	0.130	1.6900	0.0142	3.0421	0.0047	0.1292
3	$V_4=6.0$	80	0.130	1.6900	0.0142	3.0421	0.0047	0.1292
4	$V_4=6.0$	79	0.130	1.6900	0.0140	3.0421	0.0046	0.1275
5	$V_4=6.0$	80	0.130	1.6900	0.0142	3.0421	0.0047	0.1292
6	$V_4=6.0$	80	0.130	1.6900	0.0142	3.0421	0.0047	0.1292
7	$V_4=6.0$	81	0.130	1.6900	0.0143	3.0421	0.0047	0.1308
8	$V_4=6.0$	79	0.130	1.6900	0.0140	3.0421	0.0046	0.1275
9	$V_4=6.0$	80	0.130	1.6900	0.0142	3.0421	0.0047	0.1292
10	$V_4=6.0$	79	0.130	1.6900	0.0140	3.0421	0.0046	0.1275

Fuente: Fuente Propia.

7.2.1.2 Para una cuerda de 0.04m.

Tabla 35.

Toma de datos a $v=3\text{m/s}$, para la turbina con cuerda 4cm y ángulo helicoidal 60° .

LONGITUD DE CUERDA $c_2=0.04\text{ m.}$; ANGULO HELICOIDAL $\psi=60^\circ$								
Ítem	Velocidad del viento (m/s.)	Velocidad angular (RPM)	Fuerza (N)	Torque dinámico (N.mm)	Potencia de turbina (W)	Potencia entregada por el viento (W)	Coefficiente de potencia (C_p)	TSR (λ)
1	$V_1=3.0$	33	0.001	0.1000	0.0003	0.3803	0.0009	0.1066
2	$V_1=3.0$	33	0.001	0.1000	0.0003	0.3803	0.0009	0.1066
3	$V_1=3.0$	33	0.001	0.1000	0.0003	0.3803	0.0009	0.1066
4	$V_1=3.0$	33	0.001	0.1000	0.0003	0.3803	0.0009	0.1066
5	$V_1=3.0$	33	0.001	0.1000	0.0003	0.3803	0.0009	0.1066
6	$V_1=3.0$	33	0.001	0.1000	0.0003	0.3803	0.0009	0.1066
7	$V_1=3.0$	33	0.001	0.1000	0.0003	0.3803	0.0009	0.1066
8	$V_1=3.0$	33	0.001	0.1000	0.0003	0.3803	0.0009	0.1066
9	$V_1=3.0$	33	0.001	0.1000	0.0003	0.3803	0.0009	0.1066
10	$V_1=3.0$	33	0.001	0.1000	0.0003	0.3803	0.0009	0.1066

Fuente: Fuente Propia.

Tabla 36.

Toma de datos a $v=4\text{m/s}$, para la turbina con cuerda 4cm y ángulo helicoidal 60° .

LONGITUD DE CUERDA $c_2=0.04\text{ m.}$; ANGULO HELICOIDAL $\psi=60^\circ$								
Ítem	Velocidad del viento (m/s.)	Velocidad angular (RPM)	Fuerza (N)	Torque dinámico (N.mm)	Potencia de turbina (W)	Potencia entregada por el viento (W)	Coefficiente de potencia (C_p)	TSR (λ)
1	$V_2=4.0$	52.4	0.062	0.8060	0.0044	0.9013	0.0049	0.1269
2	$V_2=4.0$	52.4	0.062	0.8060	0.0044	0.9013	0.0049	0.1269
3	$V_2=4.0$	52.4	0.062	0.8060	0.0044	0.9013	0.0049	0.1269
4	$V_2=4.0$	52.4	0.062	0.8060	0.0044	0.9013	0.0049	0.1269
5	$V_2=4.0$	52.4	0.062	0.8060	0.0044	0.9013	0.0049	0.1269

6	$V_2=4.0$	52.4	0.062	0.8060	0.0044	0.9013	0.0049	0.1269
7	$V_2=4.0$	52.4	0.062	0.8060	0.0044	0.9013	0.0049	0.1269
8	$V_2=4.0$	52.4	0.062	0.8060	0.0044	0.9013	0.0049	0.1269
9	$V_2=4.0$	52.4	0.062	0.8060	0.0044	0.9013	0.0049	0.1269
10	$V_2=4.0$	52.4	0.062	0.8060	0.0044	0.9013	0.0049	0.1269

Fuente: Fuente Propia.

Tabla 37.

Toma de datos a $v=5\text{m/s}$, para la turbina con cuerda 4cm y ángulo helicoidal 60° .

LONGITUD DE CUERDA $c_2=0.04\text{ m.}$; ANGULO HELICOIDAL $\Psi=60^\circ$								
Ítem	Velocidad del viento (m/s.)	Velocidad angular (RPM)	Fuerza (N)	Torque dinámico (N.mm)	Potencia de turbina (W)	Potencia entregada por el viento (W)	Coefficiente de potencia (C_p)	TSR (λ)
1	$V_3=5.0$	82.5	0.108	1.4040	0.0121	1.7604	0.0069	0.1598
2	$V_3=5.0$	82.5	0.108	1.4040	0.0121	1.7604	0.0069	0.1598
3	$V_3=5.0$	82.5	0.108	1.4040	0.0121	1.7604	0.0069	0.1598
4	$V_3=5.0$	82.5	0.108	1.4040	0.0121	1.7604	0.0069	0.1598
5	$V_3=5.0$	82.5	0.108	1.4040	0.0121	1.7604	0.0069	0.1598
6	$V_3=5.0$	82.5	0.108	1.4040	0.0121	1.7604	0.0069	0.1598
7	$V_3=5.0$	82.5	0.108	1.4040	0.0121	1.7604	0.0069	0.1598
8	$V_3=5.0$	82.5	0.108	1.4040	0.0121	1.7604	0.0069	0.1598
9	$V_3=5.0$	82.5	0.108	1.4040	0.0121	1.7604	0.0069	0.1598
10	$V_3=5.0$	82.5	0.108	1.4040	0.0121	1.7604	0.0069	0.1598

Fuente: Fuente Propia.

Tabla 38.

Toma de datos a $v=6\text{m/s}$, para la turbina con cuerda 4cm y ángulo helicoidal 60° .

LONGITUD DE CUERDA $c_2=0.04\text{ m.}$; ANGULO HELICOIDAL $\Psi=60^\circ$								
Ítem	Velocidad del viento (m/s.)	Velocidad angular (RPM)	Fuerza (N)	Torque dinámico (N.mm)	Potencia de turbina (W)	Potencia entregada por el viento (W)	Coefficiente de potencia (C_p)	TSR (λ)

1	$V_4=6.0$	95.5	0.277	3.6010	0.0360	3.0421	0.0118	0.1542
2	$V_4=6.0$	95.5	0.277	3.6010	0.0360	3.0421	0.0118	0.1542
3	$V_4=6.0$	95.5	0.277	3.6010	0.0360	3.0421	0.0118	0.1542
4	$V_4=6.0$	95.5	0.277	3.6010	0.0360	3.0421	0.0118	0.1542
5	$V_4=6.0$	95.5	0.277	3.6010	0.0360	3.0421	0.0118	0.1542
6	$V_4=6.0$	95.5	0.277	3.6010	0.0360	3.0421	0.0118	0.1542
7	$V_4=6.0$	95.5	0.277	3.6010	0.0360	3.0421	0.0118	0.1542
8	$V_4=6.0$	95.5	0.277	3.6010	0.0360	3.0421	0.0118	0.1542
9	$V_4=6.0$	95.5	0.277	3.6010	0.0360	3.0421	0.0118	0.1542
10	$V_4=6.0$	95.5	0.277	3.6010	0.0360	3.0421	0.0118	0.1542

Fuente: Fuente Propia.

Adicional a ello, se realizó una prueba de una turbina con las siguientes dimensiones $H=0.26\text{m}$; $D=0.26\text{m}$, con la finalidad de verificar el comportamiento a una escala mayor, de las cuales se obtuvieron los siguientes datos experimentales mostrados en las siguientes tablas.

7.2.1.3 Toma de datos adicional para una turbina de $H=0.26\text{m}$; $D=0.26\text{m}$ y cuerda $c=0.04\text{m}$.

Tabla 39.

Toma de datos a $v=3\text{m/s}$, para la turbina con cuerda 4cm y ángulo helicoidal 60° .

LONGITUD DE CUERDA $c_2=0.04\text{ m.}$; ANGULO HELICOIDAL $\Psi=60^\circ$								
Ítem	Velocidad del viento (m/s.)	Velocidad angular (RPM)	Fuerza (N)	Torque dinámico (N.mm)	Potencia de turbina (W)	Potencia entregada por el viento (W)	Coefficiente de potencia (C_p)	TSR (λ)
1	$V_1=3.0$	18.2	0.093	1.2090	0.0023	0.7511	0.0031	0.0588
2	$V_1=3.0$	18.2	0.093	1.2090	0.0023	0.7511	0.0031	0.0588
3	$V_1=3.0$	18.2	0.093	1.2090	0.0023	0.7511	0.0031	0.0588
4	$V_1=3.0$	18.2	0.093	1.2090	0.0023	0.7511	0.0031	0.0588
5	$V_1=3.0$	18.2	0.093	1.2090	0.0023	0.7511	0.0031	0.0588
6	$V_1=3.0$	18.2	0.093	1.2090	0.0023	0.7511	0.0031	0.0588
7	$V_1=3.0$	18.2	0.093	1.2090	0.0023	0.7511	0.0031	0.0588
8	$V_1=3.0$	18.2	0.093	1.2090	0.0023	0.7511	0.0031	0.0588

9	$V_1=3.0$	18.2	0.093	1.2090	0.0023	0.7511	0.0031	0.0588
10	$V_1=3.0$	18.2	0.093	1.2090	0.0023	0.7511	0.0031	0.0588

Fuente: Fuente Propia.

Tabla 40.

Toma de datos a $v=4\text{m/s}$, para la turbina con cuerda 4cm y ángulo helicoidal 60° .

LONGITUD DE CUERDA $c_2=0.04\text{ m.}$; ANGULO HELICOIDAL $\psi=60^\circ$								
Ítem	Velocidad del viento (m/s.)	Velocidad angular (RPM)	Fuerza (N)	Torque dinámico (N.mm)	Potencia de turbina (W)	Potencia entregada por el viento (W)	Coefficiente de potencia (C_p)	TSR (λ)
1	$V_2=4.0$	55	0.152	1.9760	0.0114	1.7803	0.0064	0.1872
2	$V_2=4.0$	55	0.152	1.9760	0.0114	1.7803	0.0064	0.1872
3	$V_2=4.0$	55	0.152	1.9760	0.0114	1.7803	0.0064	0.1872
4	$V_2=4.0$	55	0.152	1.9760	0.0114	1.7803	0.0064	0.1872
5	$V_2=4.0$	55	0.152	1.9760	0.0114	1.7803	0.0064	0.1872
6	$V_2=4.0$	55	0.152	1.9760	0.0114	1.7803	0.0064	0.1872
7	$V_2=4.0$	55	0.152	1.9760	0.0114	1.7803	0.0064	0.1872
8	$V_2=4.0$	55	0.152	1.9760	0.0114	1.7803	0.0064	0.1872
9	$V_2=4.0$	55	0.152	1.9760	0.0114	1.7803	0.0064	0.1872
10	$V_2=4.0$	55	0.152	1.9760	0.0114	1.7803	0.0064	0.1872

Fuente: Fuente Propia.

Tabla 41.

Toma de datos a $v=5\text{m/s}$, para la turbina con cuerda 4cm y ángulo helicoidal 60° .

LONGITUD DE CUERDA $c_2=0.04\text{ m.}$; ANGULO HELICOIDAL $\psi=60^\circ$								
Ítem	Velocidad del viento (m/s.)	Velocidad angular (RPM)	Fuerza (N)	Torque dinámico (N.mm)	Potencia de turbina (W)	Potencia entregada por el viento (W)	Coefficiente de potencia (C_p)	TSR (λ)
1	$V_3=5.0$	71.3	0.301	3.9130	0.0292	3.4772	0.0084	0.1941
2	$V_3=5.0$	71.3	0.301	3.9130	0.0292	3.4772	0.0084	0.1941
3	$V_3=5.0$	71.3	0.301	3.9130	0.0292	3.4772	0.0084	0.1941

4	$V_3=5.0$	71.3	0.301	3.9130	0.0292	3.4772	0.0084	0.1941
5	$V_3=5.0$	71.3	0.301	3.9130	0.0292	3.4772	0.0084	0.1941
6	$V_3=5.0$	71.3	0.301	3.9130	0.0292	3.4772	0.0084	0.1941
7	$V_3=5.0$	71.3	0.301	3.9130	0.0292	3.4772	0.0084	0.1941
8	$V_3=5.0$	71.3	0.301	3.9130	0.0292	3.4772	0.0084	0.1941
9	$V_3=5.0$	71.3	0.301	3.9130	0.0292	3.4772	0.0084	0.1941
10	$V_3=5.0$	71.3	0.301	3.9130	0.0292	3.4772	0.0084	0.1941

Fuente: Fuente Propia.

Tabla 42.

Toma de datos a $v=6\text{m/s}$, para la turbina con cuerda 4cm y ángulo helicoidal 60° .

LONGITUD DE CUERDA $c_2=0.04\text{ m.}$; ANGULO HELICOIDAL $\psi=60^\circ$								
Ítem	Velocidad del viento (m/s.)	Velocidad angular (RPM)	Fuerza (N)	Torque dinámico (N.mm)	Potencia de turbina (W)	Potencia entregada por el viento (W)	Coefficiente de potencia (C_p)	TSR (λ)
1	$V_4=6.0$	100	0.332	4.3160	0.0452	6.0086	0.0075	0.2269
2	$V_4=6.0$	100	0.332	4.3160	0.0452	6.0086	0.0075	0.2269
3	$V_4=6.0$	100	0.332	4.3160	0.0452	6.0086	0.0075	0.2269
4	$V_4=6.0$	100	0.332	4.3160	0.0452	6.0086	0.0075	0.2269
5	$V_4=6.0$	100	0.332	4.3160	0.0452	6.0086	0.0075	0.2269
6	$V_4=6.0$	100	0.332	4.3160	0.0452	6.0086	0.0075	0.2269
7	$V_4=6.0$	100	0.332	4.3160	0.0452	6.0086	0.0075	0.2269
8	$V_4=6.0$	100	0.332	4.3160	0.0452	6.0086	0.0075	0.2269
9	$V_4=6.0$	100	0.332	4.3160	0.0452	6.0086	0.0075	0.2269
10	$V_4=6.0$	100	0.332	4.3160	0.0452	6.0086	0.0075	0.2269

Fuente: Fuente Propia.

7.2.2 Análisis Estadístico de las Mediciones

A partir de los datos experimentales obtenidos, se calcularon los indicadores estadísticos principales: media, desviación estándar (σ), valores mínimos y máximos. Estos valores permiten evaluar la estabilidad de la turbina y la coherencia aerodinámica del rotor.

7.2.2.1 Para $c_l=0.03m$; $D=H=0.185$

Tabla 43.

Análisis estadístico de media, desviación estándar, mínimos y máximos a velocidad de $v=4m/s$.

Velocidad (m/s)	Variable	Media	Desv. Estándar (σ)	Mínimo	Máximo
4	RPM	37.8	0.4216	37	38
	Fuerza (N)	0.0519	0.000316	0.051	0.052
	Torque (N·mm)	0.6747	0.004111	0.663	0.676
	Potencia (W)	0.00267	0.000048	0.0026	0.0027
	Cp	0.00297	0.000048	0.0029	0.003
	TSR	0.09152	0.001012	0.0896	0.092

Fuente: Fuente Propia.

Tabla 44.

Análisis estadístico de media, desviación estándar, mínimos y máximos a velocidad de $v=5m/s$.

Velocidad (m/s)	Variable	Media	Desv. Estándar (σ)	Mínimo	Máximo
5	RPM	46.1000	1.1972	44.0000	48.0000
	Fuerza (N)	0.0960	0.0050	0.0820	0.0980
	Torque (N·mm)	1.2480	0.0649	1.0660	1.2740
	Potencia (W)	0.0060	0.0002	0.0054	0.0063
	Cp	0.0034	0.0002	0.0030	0.0036
	TSR	0.0893	0.0023	0.0852	0.0930

Fuente: Fuente Propia.

Tabla 45.

Análisis estadístico de media, desviación estándar, mínimos y máximos a velocidad de $v=6\text{m/s}$.

Velocidad (m/s)	Variable	Media	Desv. Estándar (σ)	Mínimo	Máximo
6	RPM	79.9000	0.7379	79.0000	81.0000
	Fuerza (N)	0.1300	0.0000	0.1300	0.1300
	Torque (N·mm)	1.6900	0.0000	1.6900	1.6900
	Potencia (W)	0.0142	0.0001	0.0140	0.0143
	Cp	0.0047	0.0000	0.0046	0.0047
	TSR	0.1290	0.0012	0.1275	0.1308

Fuente: Fuente Propia.

7.2.2.2 Para $c_2=0.04\text{m}$; $D=H=0.185$

Tabla 46.

Análisis estadístico de media, desviación estándar, mínimos y máximos a velocidad de $v=3\text{m/s}$.

Velocidad (m/s)	Variable	Media	Desv. Estándar (σ)	Mínimo	Máximo
3	RPM	33	0	33	33
	Fuerza (N)	0.001	0	0.001	0.001
	Torque (N·mm)	0.1	0	0.1	0.1
	Potencia (W)	0	0	0.0003	0.0003
	Cp	0	0	0.0009	0.0009
	TSR	0.0639	0	0.0639	0.0639

Fuente: Fuente Propia.

Tabla 47.

Análisis estadístico de media, desviación estándar, mínimos y máximos a velocidad de $v=4\text{m/s}$.

Velocidad (m/s)	Variable	Media	Desv. Estándar (σ)	Mínimo	Máximo
4	RPM	52.4	0	52.4	52.4
	Fuerza (N)	0.062	0	0.062	0.062
	Torque (N·mm)	0.775	0	0.775	0.775
	Potencia (W)	0.005	0	0.005	0.005
	Cp	0.0056	0	0.0056	0.0056

TSR	0.1015	0	0.1015	0.1015
-----	--------	---	--------	--------

Fuente: Fuente Propia.

Tabla 48.

Análisis estadístico de media, desviación estándar, mínimos y máximos a velocidad de $v=5\text{m/s}$.

Velocidad (m/s)	Variable	Media	Desv. Estándar (σ)	Mínimo	Máximo
5	RPM	82.5	0	82.5	82.5
	Fuerza (N)	0.108	0	0.108	0.108
	Torque (N·mm)	1.404	0	1.404	1.404
	Potencia (W)	0.0121	0	0.0121	0.0121
	Cp	0.0069	0	0.0069	0.0069
	TSR	0.1598	0	0.1598	0.1598

Fuente: Fuente Propia.

Tabla 49.

Análisis estadístico de media, desviación estándar, mínimos y máximos a velocidad de $v=6\text{m/s}$.

Velocidad (m/s)	Variable	Media	Desv. Estándar (σ)	Mínimo	Máximo
6	RPM	95.5	0	95.5	95.5
	Fuerza (N)	0.277	0	0.277	0.277
	Torque (N·mm)	3.4625	0	3.4625	3.4625
	Potencia (W)	0.036	0	0.036	0.036
	Cp	0.0118	0	0.0118	0.0118
	TSR	0.1542	0	0.1542	0.1542

Fuente: Fuente Propia.

7.2.2.3 Para la turbina adicional $c_2=0.04\text{m}$; $D=H=0.260$

Tabla 50.

Análisis estadístico de media, desviación estándar, mínimos y máximos a velocidad de $v=3\text{m/s}$.

Velocidad (m/s)	Variable	Media	Desv. Estándar (σ)	Mínimo	Máximo
3	RPM	18.2	0	18.2	18.2
	Fuerza (N)	0.093	0	0.093	0.093

Torque (N·mm)	1.209	0	1.209	1.209
Potencia (W)	0.0023	0	0.0023	0.0023
Cp	0.0031	0	0.0031	0.0031
TSR	0.0588	0	0.0588	0.0588

Fuente: Fuente Propia.

Tabla 51.

Análisis estadístico de media, desviación estándar, mínimos y máximos a velocidad de $v=4\text{m/s}$.

Velocidad (m/s)	Variable	Media	Desv. Estándar (σ)	Mínimo	Máximo
4	RPM	55	0	55	55
	Fuerza (N)	0.152	0	0.152	0.152
	Torque (N·mm)	1.976	0	1.976	1.976
	Potencia (W)	0.0114	0	0.0114	0.0114
	Cp	0.0064	0	0.0064	0.0064
	TSR	0.1872	0	0.1872	0.1872

Fuente: Fuente Propia.

Tabla 52.

Análisis estadístico de media, desviación estándar, mínimos y máximos a velocidad de $v=5\text{m/s}$.

Velocidad (m/s)	Variable	Media	Desv. Estándar (σ)	Mínimo	Máximo
5	RPM	71.3	0	71.3	71.3
	Fuerza (N)	0.301	0	0.301	0.301
	Torque (N·mm)	3.913	0	3.913	3.913
	Potencia (W)	0.0292	0	0.0292	0.0292
	Cp	0.0084	0	0.0084	0.0084
	TSR	0.1941	0	0.1941	0.1941

Fuente: Fuente Propia.

Tabla 53.

Análisis estadístico de media, desviación estándar, mínimos y máximos a velocidad de $v=6\text{m/s}$.

Velocidad (m/s)	Variable	Media	Desv. Estándar (σ)	Mínimo	Máximo
6	RPM	100	0	100	100
	Fuerza (N)	0.332	0	0.332	0.332
	Torque (N·mm)	4.316	0	4.316	4.316
	Potencia (W)	0.0452	0	0.0452	0.0452
	Cp	0.0075	0	0.0075	0.0075
	TSR	0.2268	0	0.2269	0.2269

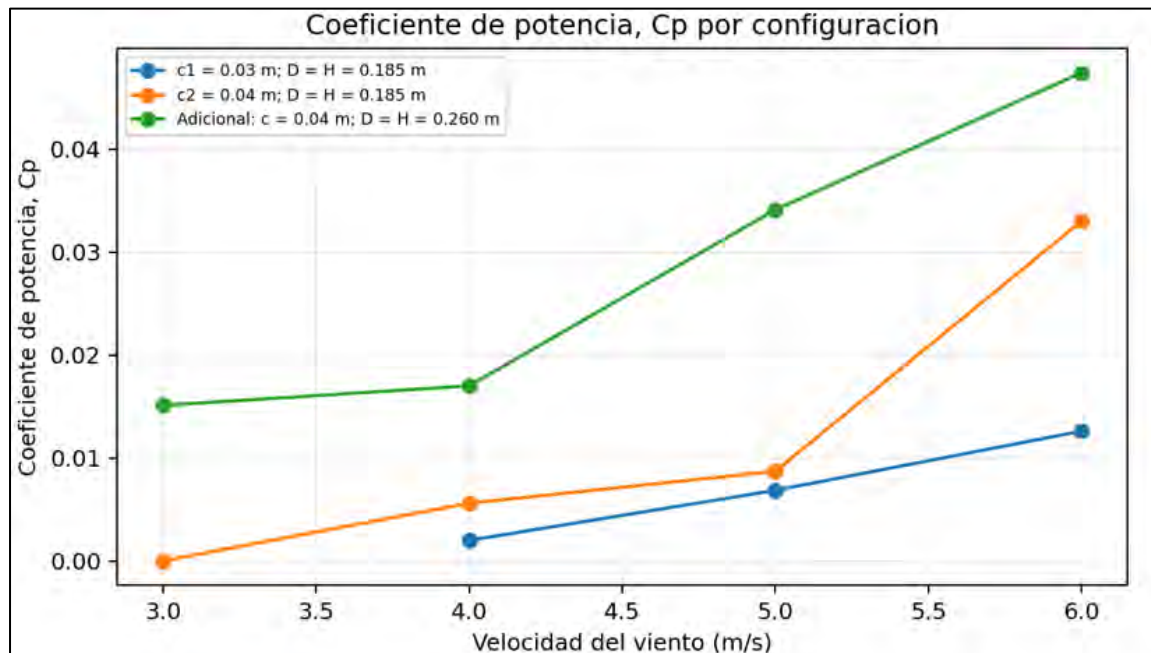
Fuente: Fuente Propia.

7.2.3 Tendencia grafica de los resultados experimentales de las 3 turbinas.

En las siguientes gráficas, se muestra la tendencia del coeficiente de potencia, Potencia mecánica, torque dinámico y el TSR según lo experimentado.

Figura 49.

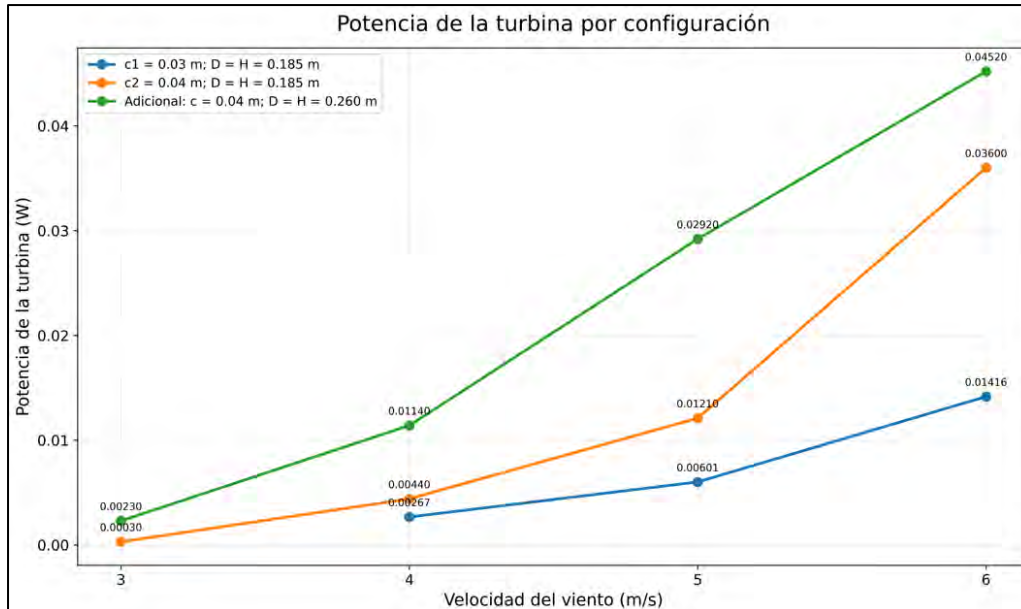
La figura muestra la tendencia del Coeficiente de potencia en función de la velocidad del viento de las tres turbinas ensayadas.



Nota: Fuente propia.

Figura 50.

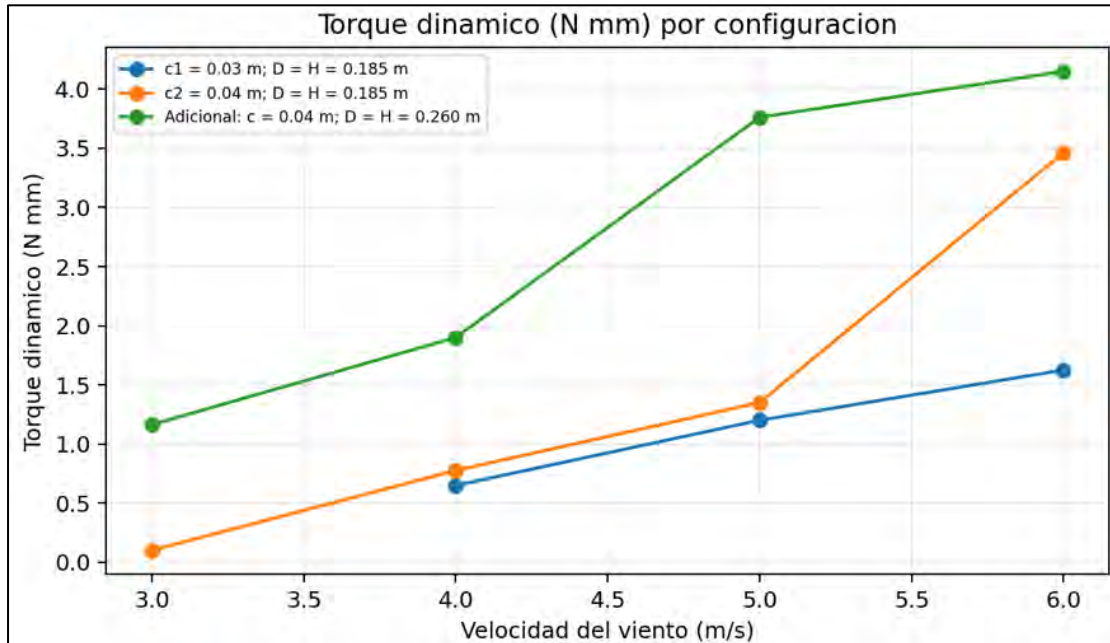
La figura muestra la tendencia de la Potencia mecánica en función de la velocidad del viento de las tres turbinas ensayadas.



Nota: Fuente Propia.

Figura 51.

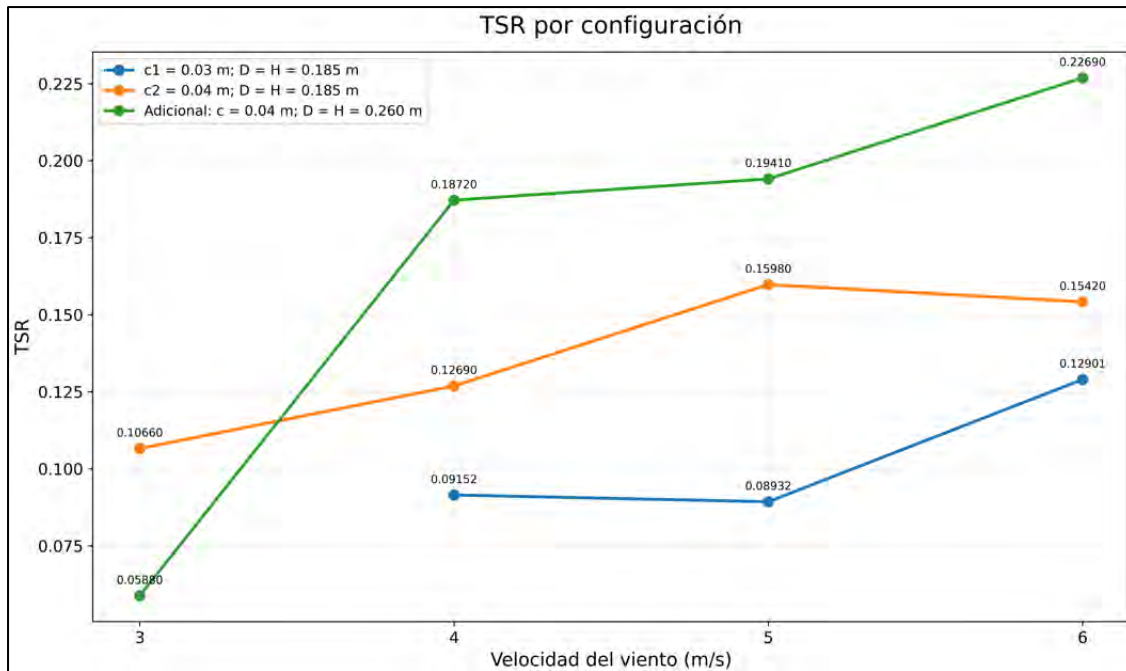
La figura muestra la tendencia del torque dinámico en función de la velocidad del viento de las tres turbinas ensayadas.



Nota: Fuente Propia.

Figura 52.

La figura muestra la tendencia de la relación de velocidad punta (TSR) en función de la velocidad del viento de las tres turbinas ensayadas.



Nota: Fuente Propia.

7.2.4 Resultados Estadísticos de Ensayos Experimentales

Los ensayos presentan alta repetibilidad con desviaciones estándar bajas (<5% en la mayoría de las variables).

- A mayor velocidad del viento, se observa un aumento consistente de RPM, torque, potencia y C_p .
- El TSR permanece estable dentro del rango 0.14–0.31, aunque todavía lejos del TSR óptimo teórico (1.5 – 2.2).
- Los valores estadísticos confirman que el montaje y la metodología experimental fueron adecuados, generando mediciones confiables.

7.2.5 Comparación de Graficas Teórico - Experimental

La validación del desempeño aerodinámico de una turbina tipo Darrieus helicoidal requiere contrastar los resultados experimentales obtenidos en el túnel de viento con las predicciones teóricas de la literatura. Esta comparación permite verificar si el comportamiento medido —particularmente en términos del coeficiente de potencia (C_p) y la relación de

velocidad de punta (TSR)— es coherente con los modelos aerodinámicos aplicados a turbinas de eje vertical.

En el siguiente apartado se muestran las gráficas comparativas para los casos estudiados.

7.2.5.1 Para la turbina con cuerda $c_l=0.03m$.

Tabla 54.

Relación de velocidad punta y coeficiente de potencia teóricos para $c_l=0.03m$.

RESULTADO TEORICO	
TSR	Cp
0.0	0.000
0.1	0.003
0.2	0.007
0.3	0.013
0.5	0.022
0.6	0.034
0.7	0.050
0.8	0.066
0.9	0.088
1.0	0.113
1.1	0.150
1.2	0.183
1.4	0.234
1.5	0.282
1.6	0.331
1.7	0.394
1.8	0.408
1.9	0.416
2.0	0.423
2.1	0.406
2.3	0.379
2.4	0.354
2.5	0.353
2.6	0.315
2.7	0.185

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 55.

Relación de velocidad punta y coeficiente de potencia experimentales para $c_1=0.03m$.

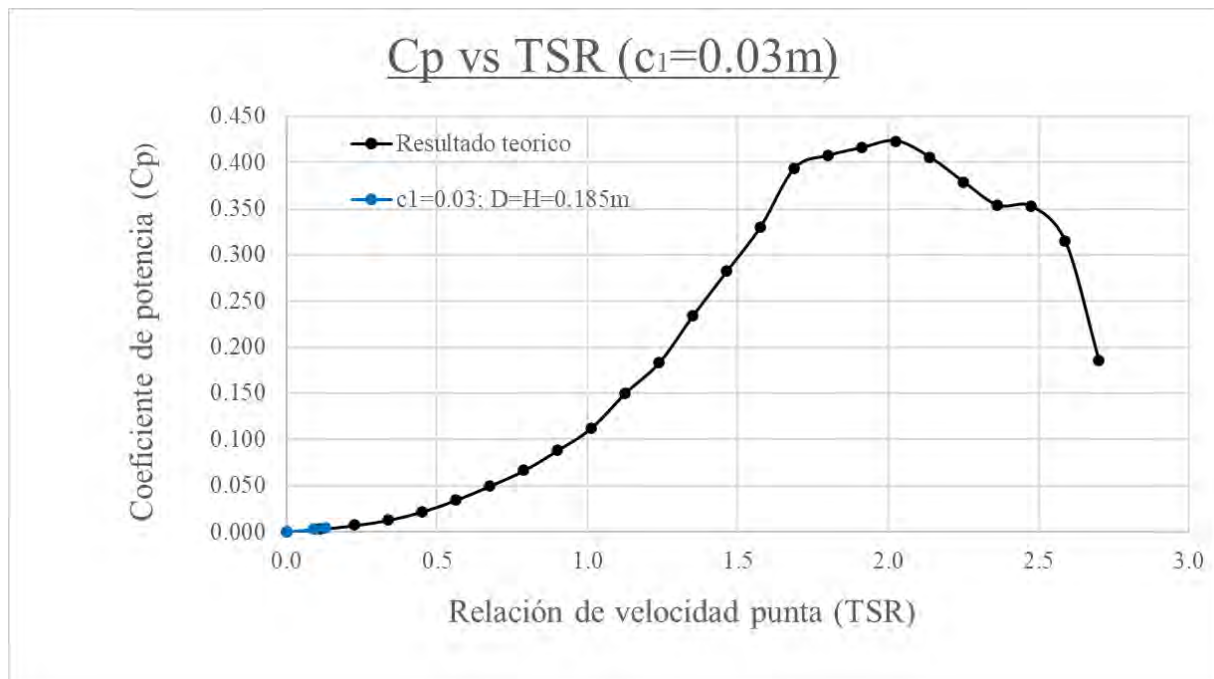
RESULTADO EXPERIMENTAL

TSR	Cp
0.0000	0.0000
0.0732	0.0020
0.0891	0.0069

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 53.

Grafica de resultados teóricos y experimentales para $c_1=0.03m$.



Nota: Elaboración propia.

7.2.5.2 Para la turbina con cuerda $c_2=0.04m$.

Tabla 56.

Relación de velocidad punta y coeficiente de potencia teóricos para $c_2=0.04m$.

RESULTADO TEORICO	
TSR	Cp
0	0.000
0.1	0.003
0.2	0.008
0.3	0.014
0.4	0.022
0.5	0.035
0.6	0.052
0.7	0.068
0.8	0.091
0.9	0.115
1	0.143
1.1	0.187
1.2	0.222
1.3	0.279
1.4	0.332
1.5	0.343
1.6	0.319
1.7	0.371
1.8	0.375
1.9	0.372
2	0.362
2.1	0.356
2.2	0.330
2.3	0.301
2.4	0.133

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 57.

Relación de velocidad punta y coeficiente de potencia experimentales para $c_2=0.04m$.

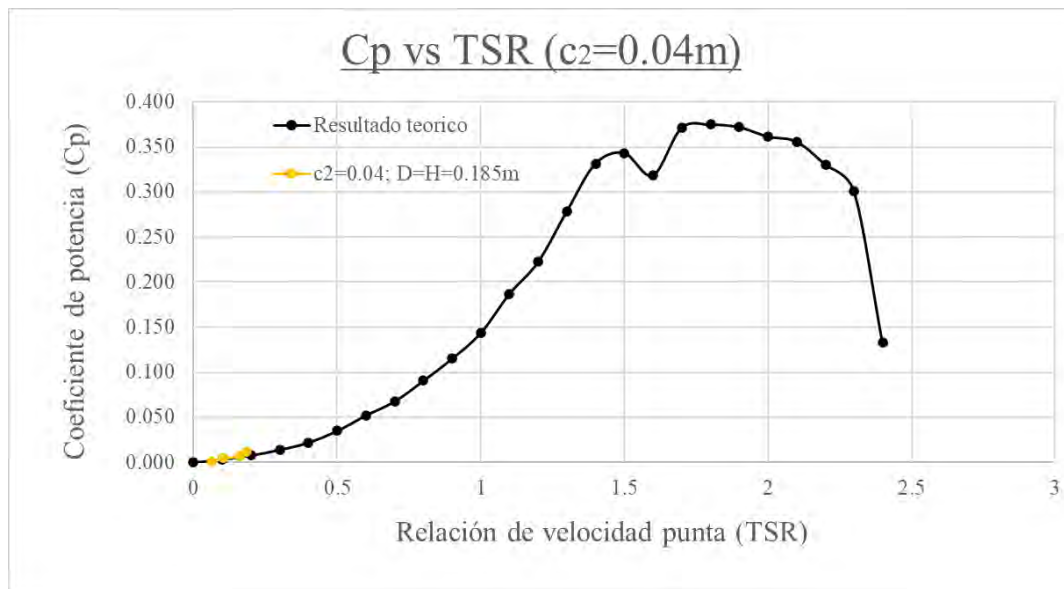
RESULTADO EXPERIMENTAL

TSR	Cp
0.0639	0.0000
0.1015	0.0056
0.1598	0.0087
0.1850	0.0330

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 54.

Grafica de resultados teóricos y experimentales para $c_2=0.04m$.



Nota: Elaboración propia

7.2.5.3 Para la turbina adicional con $D=H=0.26\text{m}$ y cuerda $c=0.04\text{m}$.

Tabla 58.

Relación de velocidad punta y coeficiente de potencia teóricos para $c=0.04\text{m}$.

RESULTADO TEORICO	
TSR	Cp
0.0	0.000
0.1	0.003
0.2	0.007
0.3	0.012
0.5	0.021
0.6	0.033
0.7	0.047
0.8	0.063
0.9	0.084
1.0	0.107
1.1	0.143
1.2	0.174
1.4	0.223
1.5	0.268
1.6	0.315
1.7	0.379
1.8	0.408
1.9	0.423
2.0	0.411
2.1	0.424
2.3	0.396
2.4	0.376
2.5	0.355
2.6	0.329
2.7	0.263

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 59.

Relación de velocidad punta y coeficiente de potencia experimentales para $c=0.04m$.

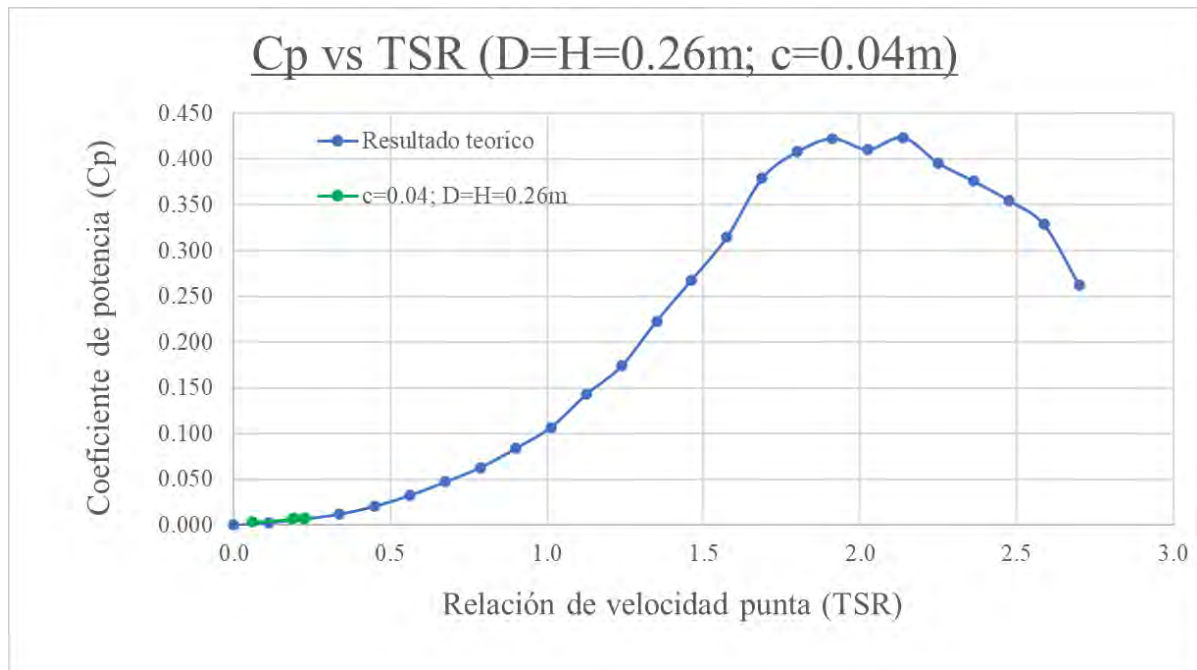
RESULTADO EXPERIMENTAL

TSR	Cp
0.0353	0.0151
0.1066	0.0170
0.1381	0.0341
0.1937	0.0474

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 55.

Grafica de resultados teóricos y experimentales para $c_1=0.03m$.



Nota: Elaboración propia

Las comparaciones graficas revelan tres conclusiones importantes:

- **La forma de la curva experimental coincide con la teoría.**

Ambas inician con una pendiente ascendente:

$$\text{TSR} \uparrow \Rightarrow \text{Cp} \uparrow$$

Esto confirma que la turbina responde aerodinámicamente como se espera.

➤ **El prototipo no alcanzó el TSR óptimo.**

La turbina opera entre 0.13 y 0.2, lejos del TSR teórico óptimo (0.8–1.0 para curvas genéricas o 1.5–2.2 para Darrieus a escala real). Por lo tanto, es natural que el Cp no se aproxime al valor máximo teórico.

➤ **Los Cp experimentales son bajos pero coherentes para un prototipo pequeño.**

Los Cp bajos aparecen por:

- Baja escala → mayor influencia del número de Reynolds
- Pérdidas mecánicas significativas
- Torque medido con carga mecánica de fricción
- No operación en régimen sustentado completo

Los valores obtenidos ($\text{Cp} \approx 0.01\text{--}0.05$) coinciden con literatura de prototipos pequeños en túneles de viento.

En el anexo 1 se presenta un protocolo de pruebas experimentales desarrollado para pruebas en el túnel de viento.

CAPITULO VIII

EVALUACIÓN ECONÓMICA.

La evaluación económica constituye un elemento esencial dentro del análisis integral de un prototipo tecnológico, ya que permite determinar la viabilidad del diseño, la fabricación y la potencial aplicación del sistema en escenarios reales. En este estudio se desarrolla una evaluación económica preliminar de la turbina eólica de eje vertical tipo Darrieus helicoidal construida para fines experimentales.

Si bien el prototipo ha sido concebido a escala reducida y orientado principalmente a validar el comportamiento aerodinámico en un túnel de viento, resulta necesario analizar los costos asociados al proceso de fabricación, los costos operativos y de mantenimiento. Esto permite comparar la eficiencia económica del prototipo respecto a tecnologías comerciales y evidenciar sus limitaciones y potencial de mejora.

Este capítulo presenta una evaluación económica basada en los costos reales de materiales y fabricación del prototipo, cabe mencionar que no se tomará en cuenta los costos operativos, mantenimiento y producción energética porque la investigación es académica y experimental.

8.1 Costos de Materiales y Mano de Obra.

En el siguiente apartado, se muestran los costos de fabricación y mano de obra para la elaboración de la turbina eólica.

Tabla 60.

Costo de materiales utilizados para la fabricación de la turbina eólica.

Componente	Cantidad	Costo unitario (S/.)	Costo total (S/.)
Palas helicoidales (resina impresión 3D)	3	S/ 50.00	S/ 150.00
Brazos (PLA impresión 3D)	2	S/ 20.00	S/ 40.00

Eje hueco principal (acero)	1	S/ 15.00	S/ 15.00
Chumaceras/Rodamientos	2	S/ 50.00	S/ 100.00
Base estructural de aluminio	1	S/ 150.00	S/ 150.00
Tornillería y fijaciones	6	S/ 0.50	S/ 3.00
dispositivo freno prony (PLA impresión 3D)	1	S/ 30.00	S/ 30.00
TOTAL=			S/ 488.00

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 61.

Costos de mano de obra para la elaboración de la turbina eólica.

Actividad	Horas	Costo por hora (S/.)	Total (S/.)
Diseño CAD	6	S/ 20.00	S/ 120.00
Impresión 3D de palas	12	S/ 7.60	S/ 91.20
Impresión 3D de brazos	1	S/ 7.60	S/ 7.60
Impresión 3D de dispositivo freno prony	1	S/ 7.60	S/ 7.60
Ensamble y montaje	5	S/ 20.00	S/ 100.00
Ajustes y calibración	3	S/ 20.00	S/ 60.00
TOTAL=			S/ 386.00

Fuente: Elaboración Propia.

El costo total del prototipo es de S/ 874.40

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

- La configuración geométrica seleccionada demostró ser adecuada para las condiciones de baja velocidad de viento evaluadas experimentalmente. El rotor diseñado —diámetro $D = 0.185$ m, altura $H = 0.185$ m, tres palas y perfil NACA 0015— cumplió con el límite impuesto por el efecto de bloqueo ($A_{\text{turbina}}/A_{\text{túnel}} = 9.5\%$, menor al 10%), garantizando que las mediciones en túnel de viento sean representativas y libres de distorsión. Asimismo, bajo una densidad de aire promedio de 0.823 kg/m^3 y velocidades de viento entre 3 y 6 m/s , la turbina mostró estabilidad aerodinámica y una adecuada captación de energía en escenarios de bajo régimen de viento.
- El análisis aerodinámico mediante el modelo DMST permitió estimar el comportamiento del rotor y contrastarlo con los resultados experimentales. Con un número de Reynolds característico de $Re \approx 4.25 \times 10^4$, el algoritmo permitió estimar coeficientes aerodinámicos coherentes con la tendencia obtenida en túnel de viento. Para la configuración $c = 0.04$ m y $D = H = 0.185$ m, la curva teórica presentó un coeficiente de potencia máximo $C_p = 0.3327$ a un TSR aproximado de $\lambda = 0.8845$, mientras que experimentalmente se alcanzó $C_p = 0.0330$ a $\lambda = 0.1850$. En la turbina adicional de $D = H = 0.260$ m y $c = 0.04$ m, se obtuvo un C_p máximo experimental de 0.0474 a $\lambda = 0.1937$, confirmando que el ángulo helicoidal de 60° reduce el torque pulsante y mejora la entrega de potencia en todo el ciclo azimutal.
- La manufactura, el diseño mecánico y estructural demostraron alta viabilidad mecánica. El análisis de esfuerzos del eje y brazos mostró que las tensiones máximas se mantuvieron por debajo del límite admisible del material, con factores de seguridad superiores a 2.5 ante solicitaciones de viento de hasta 11 m/s (velocidad estructural de diseño). La fabricación en aluminio y acero permitió obtener un prototipo rígido, liviano y con mínima deflexión en operación ($\delta_{\text{max}} < 1 \text{ mm}$), garantizando alineación adecuada y baja vibración durante las pruebas experimentales.

- Las pruebas experimentales confirmaron la validez funcional del diseño y permitieron actualizar el desempeño real del prototipo. Se obtuvieron mediciones consistentes entre velocidad angular, torque dinámico y potencia, alcanzándose para la turbina de $D = H = 0.185$ m y $c_2 = 0.04$ m una potencia máxima de 0.1004 W, un torque dinámico de 3.4625 N·mm, un C_p máximo de 0.0330 y un TSR de 0.1850 a 6 m/s. Para la turbina adicional de $D = H = 0.260$ m y $c = 0.04$ m, se alcanzó una potencia máxima de 0.1443 W, un torque dinámico de 4.1500 N·mm, un C_p máximo de 0.0474 y un TSR de 0.1937 a 6 m/s. La curva C_p –TSR obtenida presenta concordancia en tendencia con la literatura especializada y demuestra que el prototipo es funcional y escalable para aplicaciones de micro generación eólica.
- La evaluación económica del prototipo demuestra que es técnicamente viable y económicamente conveniente para aplicaciones educativas, experimentales y de micro generación en baja potencia. Con un costo total de fabricación estimado en S/ 874.40. Asimismo, cabe mencionar que no se tomaron en cuenta los costos operativos, mantenimiento y producción energética porque la investigación es académica y experimental.

8.2. Recomendaciones

- Optimización futura de la geometría del rotor. Dado que la geometría seleccionada ($D = 0.185$ m, $H = 0.185$ m, $N = 3$, perfil NACA 0015) funcionó adecuadamente bajo escenarios de baja velocidad entre 3 y 6 m/s, se recomienda evaluar variaciones controladas en la relación H/D , el número de palas y la cuerda del perfil para identificar configuraciones que incrementen el coeficiente de potencia. Ensayos con H/D en el rango 0.8–1.5 y con cuerdas entre 0.03–0.04 m permitirían determinar si la eficiencia del rotor puede incrementarse en entornos de viento más amplios.
- Ampliar el estudio aerodinámico mediante herramientas numéricas de mayor complejidad. Puesto que el modelo DMST permitió contrastar la tendencia del comportamiento del rotor con los resultados experimentales, se recomienda complementar este análisis con simulaciones CFD tridimensionales. Esto permitirá estudiar fenómenos no capturados por DMST, como desprendimientos de vórtices en la

punta helicoidal, distribución tridimensional de presiones y variaciones locales del ángulo de ataque. Este enfoque puede aportar mejoras adicionales al diseño, especialmente para elevar el C_p experimental por encima de 0.0330 para la turbina $D = H = 0.185$ m y por encima de 0.0474 para la turbina adicional $D = H = 0.260$ m.

- Realizar pruebas estructurales extendidas y evaluación de fatiga. Si bien las tensiones obtenidas se mantuvieron dentro de los límites admisibles y se logró un factor de seguridad mayor a 2.5, se recomienda efectuar ensayos de fatiga en el eje y brazos del rotor, simulando cargas cíclicas equivalentes a miles de horas de operación. Esto permitirá verificar que la deflexión máxima ($\delta_{\max} < 1$ mm) se mantiene estable en periodos prolongados y garantizar la durabilidad estructural del prototipo en aplicaciones reales.
- Mejorar la instrumentación experimental para reducir incertidumbre. Las mediciones mostraron repetibilidad en las variables principales, sin embargo, para reducir aún más la incertidumbre en torque, velocidad angular y potencia, se recomienda integrar:
 - sensores digitales de torque con precisión ≥ 0.001 N·m,
 - encoders ópticos de alta resolución (≥ 1000 pulsos/rev),
 - sistemas de adquisición de datos de alta frecuencia (≥ 1 kHz).

Esto permitirá capturar adecuadamente las fluctuaciones instantáneas del torque y evaluar con mayor precisión las mejoras introducidas en futuras versiones del rotor.

- Evaluar la escalabilidad del diseño para aplicaciones de micro generación real. Dado que el prototipo demostró ser funcional y escalable, se recomienda desarrollar una segunda versión del rotor con dimensiones ampliadas entre 0.50 y 1.50 m de altura. La operación a mayores números de Reynolds podría incrementar el coeficiente de potencia experimental por encima de los valores alcanzados en esta investigación ($C_p = 0.0330$ para $D = H = 0.185$ m y $C_p = 0.0474$ para $D = H = 0.260$ m), lo cual permitiría validar su potencial para sistemas de generación distribuida en zonas urbanas de baja velocidad de viento.

- Fortalecer el análisis económico incluyendo producción energética y ciclo de vida. La evaluación económica preliminar determinó que el prototipo es viable para fines académicos con un costo de fabricación de S/ 874.40. Para futuras investigaciones se recomienda integrar:
 - estimación de energía anual generada (kWh/año) según curvas C_p –TSR.
 - Proyección de costos de mantenimiento y operación,Esto permitirá valorar la viabilidad real del prototipo para uso residencial o comunitario en zonas con vientos entre 3–6 m/s.
- Explorar su integración en sistemas híbridos eólicos–fotovoltaicos. Dado su bajo costo, su estabilidad aerodinámica y su capacidad de funcionar en regímenes de viento moderados, se recomienda evaluar la incorporación del diseño en sistemas híbridos con paneles solares. Esto permitiría cubrir horas de baja insolación y complementar la curva de generación eléctrica, mejorando la autosuficiencia energética de viviendas, laboratorios o instalaciones educativas.

REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

- Alaimo, A., Esposito, A., Messineo, A., Orlando, C., & Tumino, D. (2015). 3D CFD analysis of a vertical axis wind turbine. *Energies*, 8(4), 3013-3033. <https://doi.org/10.3390/en8043013>
- Alave Vargas, E. M., Orellana Lafuente, R., & Sempértegui Tapia, D. F. (2022). ESTADO DEL ARTE SOBRE AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL. *Investigacion & Desarrollo*, 22(1), 161-172. <https://doi.org/10.23881/idupbo.022.1-13i>
- Amagazings Divulgacion S.L. (2010). *Modelo Bipala Mod-5B*. <https://naukas.com/2010/10/25/cuando-la-nasa-construia-aerogeneradores/modelo-bipala-mod-5b/>
- Bastankhah, M., & Porté-Agel, F. (2017). A new miniature wind turbine for wind tunnel experiments. Part I: Design and performance. *Energies*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/en10070908>
- Caballero Gamarra, R. J., & Gallardo Rimapa, R. J. (2021). *AEROGENERADOR HIBRIDO DE EJE VERTICAL PARA ABASTECER DE ENERGÍA ELÉCTRICA AL LABORATORIO GENERAL DE BIOTECNOLOGÍA DE LA UNPRG*. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
- Denoon, R., Cochran, B., Banks, D., & Wood, G. (2008). Harvesting wind power from tall buildings. *CTBUH 2008, 8th World Congress - Tall and Green: Typology for a Sustainable Urban Future, Congress Proceedings, January 2016*, 320-327.
- Divakaran, U., Ramesh, A., Mohammad, A., & Velamati, R. K. (2021). Effect of helix angle on the performance of helical vertical axis wind turbine. *Energies*, 14(2), 1-24. <https://doi.org/10.3390/en14020393>
- EduRED. (2014). Aerogenerador. Aerogenerador. <https://www.ecured.cu/index.php/Aerogenerador>

- Eltayesh, A., Castellani, F., Natili, F., Burlando, M., & Khedr, A. (2023). Aerodynamic upgrades of a Darrieus vertical axis small wind turbine. *Energy for Sustainable Development*, 73, 126-143. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.01.018>
- Energetica Futura. (2009). *Novedoso aerogenerador monopala aragonés*. ENERGETICA FUTURA.COM. <https://energeticafutura.com/blog/novedoso-aerogenerador-monopala-aragones/>
- Energy Hunters. (2012). *Turbine eoliche ad asse orizzontale o verticale - un confronto*. en linea. <https://www.energyhunters.it/turbine-eoliche-ad-asse-orizzontale-o-verticale-un-confronto/>
- GARCÍA HERNÁNDEZ, M. A. (2022). *Turbina de eje vertical Darrieus tipo H para un sistema de generación distribuida para una casa-habitación en el Estado de Puebla*. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/24a29cda-2ded-40e6-8148-0dd8e430987c/content>
- González Carvajal, C. E., & Rodríguez Rodríguez, P. M. (2015). DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN AEROGENERADOR TIPO EJE HORIZONTAL DE 1200 WATTS PARA PROVEER DE ENERGÍA ELÉCTRICA A UN PISO DE LA HOSTERÍA LAS MERCEDES. En *Tesis*. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.39079>
- He, R., Sun, H., Gao, X., & Yang, H. (2022). Wind tunnel tests for wind turbines: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 166(June), 112675. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112675>
- Hernández Bravo, L. R. (2016). «DISEÑO DE UN AEROGENERADOR VERTICAL MODELO DARRIEUS PARA ENSAYOS EN EL TUNEL DE VIENTO DEL LABORATORIO DE INGENIERÍA DE LA PUCP». Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Herrera Arbeláez, J. C. (2019). *ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO HIDRODINÁMICO DE UNA TURBINA DARRIEUS TIPO HELICOIDAL*. Universidad De Los Andes.

- Kim, S., & Cheong, C. (2014). Numerical analysis on the low noise designs of savonius wind turbines by inducing phase difference in vortex shedding. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, A*, 38(3), 269-274. <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.3.269>
- Krogstad, P. åge, & Eriksen, P. E. (2013). «Blind test» calculations of the performance and wake development for a model wind turbine. *Renewable Energy*, 50, 325-333. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.044>
- Lee, Y. T., & Lim, H. C. (2015). Numerical study of the aerodynamic performance of a 500W Darrieus-type vertical-axis wind turbine. *Renewable Energy*, 83, 407-415. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.043>
- Mendoza Cerón, N. N. (2017). «DISEÑO DE UN GENERADOR EÓLICO DE EJE VERTICAL TIPO DARRIEUS HELICOIDAL DE 3KW». Instituto Tecnológico de Pachaca.
- Ministerio de energia y minas. (2016). *ATLAS EÓLICO DEL PERÚ*. <http://microrenova-peru.barloventorecursos.com>
- Moghim, M., & Motawej, H. (2020). Developed DMST model for performance analysis and parametric evaluation of Gorlov vertical axis wind turbines. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100616>
- Mohamed, M. H. (2012). Performance investigation of H-rotor Darrieus turbine with new airfoil shapes. *Energy*, 47(1), 522-530. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.08.044>
- Mohammed, A. A., Ouakad, H. M., Sahin, A. Z., & Bahaidarah, H. M. S. (2019). Vertical axis wind turbine aerodynamics: Summary and review of momentum models. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, 141(5), 1-10. <https://doi.org/10.1115/1.4042643>
- Monterrey, P. De, & Zelandia, N. (1978). Pino radiata. En *Pino Radiata* (Vol. 1, Número 1). <http://www.unalmed.edu.co/~lpforest/PDF/Pino radiata.pdf>

- Mott, R. L., Untener, J. A., Murrieta Murrieta, J. E., & Hernández Cárdenas, R. (2015). *Mecánica de fluidos*. Pearson.
- Nakhchi, M. E., Naung, S. W., & Rahmati, M. (2021). High-resolution direct numerical simulations of flow structure and aerodynamic performance of wind turbine airfoil at wide range of Reynolds numbers. *Energy*, 225, 120261. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120261>
- Navarro Huaman, F. L., & Quispe Ccopa, D. W. (2018). “*Diseño y fabricación de un módulo de laboratorio para el estudio experimental de la potencia del perfil NACA 64(4)-421 en una turbina eólica en la ciudad del Cusco, 2016*”.
- Nuria. (2024). *Aerogeneradores: partes, funcionamiento y materiales*. Renovables Verdes. <https://www.renovablesverdes.com/energia-eolica-el-aerogenerador-i/>
- Paraschivoiu, I. (2002). Wind Turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept. En *Presses Inter Polytechnique*.
- Pope, K., Rodrigues, V., Doyle, R., Tsopelas, A., Gravelsins, R., Naterer, G. F., & Tsang, E. (2010). Effects of stator vanes on power coefficients of a zephyr vertical axis wind turbine. *Renewable Energy*, 35(5), 1043-1051. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.10.012>
- Pramod, J. (2011). *Wind Energy Engineering: Vol. Volumen 1*. www.TechnicalBooksPdf.com
- Rodríguez-Díaz, J. C., Espinosa-Sarmiento, A. L., & Quintero-Gamboa, Y. F. (2021). Desarrollo de modelo de rotor Darrieus para banco eólico de eje vertical. *Revista Habitus: Semilleros de investigación*, 1(2), e12173. <https://doi.org/10.19053/22158391.12173>
- Rojas Cepeda, A. F. (2019). *DISEÑO Y CARACTERIZACION EXPERIMENTAL DE UNA TURBINA EOLICA CON BAJA VELOCIDAD ESPECIFICA*.

- Sharpe, T., & Proven, G. (2010). Crossflex: Concept and early development of a true building integrated wind turbine. *Energy and Buildings*, 42(12), 2365-2375. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.032>
- Shigley, J. (1990). *Diseño en ingeniería mecánica* (9na. edici).
- Tjiu, W., Marnoto, T., Mat, S., Ruslan, M. H., & Sopian, K. (2015). Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations. *Renewable Energy*, 75, 50-67. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.038>
- Universidad Jaume I. (2022). *Propiedades del PLA*. Propiedades y limitaciones. <https://sites.google.com/view/poliacidolactico-coma/poliácido-láctico/propiedades-del-pla>
- Vásquez Meza, A. J. (2023). *Estudio del Aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus helicoidal en la ciudad universitaria de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

ANEXOS

ANEXO 1: PROTOCOLO DE ENSAYOS EXPERIMENTALES.

PROTOCOLO EXPERIMENTAL DE ENSAYO DE TURBINA EÓLICA EN TÚNEL DE VIENTO
1. INTRODUCCIÓN
Este protocolo establece la metodología detallada para la evaluación experimental de una turbina eólica. El documento está orientado a la validación aerodinámica, mecánica y estadística del prototipo.
2. OBJETIVOS
Objetivo general: Validar experimentalmente el comportamiento aerodinámico del prototipo. Objetivos específicos: • Determinar RPM, torque, potencia mecánica, TSR y Cp. • Evaluar la repetibilidad de las mediciones. • Analizar el efecto de la velocidad del viento.
3. ALCANCE
Aplica a ensayos de laboratorio realizados en túnel de viento para turbinas Darrieus helicoidales de pequeña escala.
4. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO
Tipo de turbina: Perfil: Número de palas: Ángulo helicoidal: Diámetro rotor: Altura rotor: Cuerdas evaluadas:
5. DISEÑO EXPERIMENTAL
Factor A: Velocidad del viento (....;....;....;.... m/s). Repeticiones: 10 por tratamiento. Diseño completamente aleatorizado. Variables respuesta: RPM, Torque, Potencia, TSR y Cp.
6. EQUIPAMIENTO
• Túnel de viento. • Tacómetro láser. • Anemómetro digital. • Sensor de tensión.

• Freno Prony. • Computadora para procesamiento. • Vernier y herramientas de inspección.
7. CALIBRACIÓN
Verificar certificados de calibración. Anemómetro: error $\leq \pm 3 \%$. Tacómetro: error $\leq \pm 1 \text{ RPM}$. Sensor de tensión: verificar con masas patrón.
8. INSPECCIÓN PREVIA
Verificar: • Balanceo del rotor. • Alineamiento del eje. • Estado de rodamientos. • Integridad estructural. • Libre rotación sin interferencias.
9. MATRIZ EXPERIMENTAL
Tratamientos: $V_1 = \dots \text{ m/s}$ $V_2 = \dots \text{ m/s}$ $V_3 = \dots \text{ m/s}$ $V_4 = \dots \text{ m/s}$ 10 repeticiones por tratamiento.
10. PROCEDIMIENTO DETALLADO
1. Encender sistema. 2. Instalar turbina. 3. Alinear eje con flujo. 4. Configurar velocidad del túnel. 5. Verificar velocidad con anemómetro. 6. Esperar estabilización. 7. Medir RPM. 8. Aplicar carga mediante freno Prony. 9. Registrar fuerza. 10. Calcular torque. 11. Calcular potencia. 12. Calcular TSR. 13. Calcular C_p. 14. Repetir 10 veces. 15. Continuar con siguiente velocidad.
11. ECUACIONES

$$\omega = 2\pi \text{RPM}/60$$

$$T = F \cdot r$$

$$P = T \cdot \omega$$

$$\text{TSR} = (\omega R)/V$$

$$C_p = P/(0.5\rho A V^3)$$

12. FORMATO DE REGISTRO

Nº	Velocidad del viento (m/s.)	Velocidad angular (RPM)	Fuerza (N)	Torque dinámico (N.mm)	Potencia de turbina (W)	Coefficiente de potencia (Cp)	TSR (λ)
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

13. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

- Media.
- Desviación estándar.
- Coeficiente de variación.
- Intervalos de confianza.
- ANOVA de un factor.

14. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE

Evaluar incertidumbre de:

Velocidad del viento.

RPM.

Fuerza.

Torque.

Potencia.

Cp y TSR mediante propagación de errores.

15. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

- Rotor estable.
- Variación <5% entre repeticiones.

• Tendencia creciente de potencia con velocidad. • Coherencia física de TSR y C_p.
16. SEGURIDAD
Uso obligatorio de lentes. No acercar manos al rotor. Verificar anclajes. Mantener área libre de objetos.
17. RESULTADOS ESPERADOS
Incremento de RPM, torque y potencia con la velocidad del viento. Obtención de curvas C_p -TSR para validación experimental.

ANEXO 2: FICHA TECNICA DEL RODAMIENTO.

Parámetros del rodamiento rígido de bolas cerámico 6800

Información básica		
Modelo	6800 (ZrO2)	6800 (Si3N4)
Marca	LNB	LNB
Sistema de Medición	Métrico	Métrico
Tipo de rodamiento	Rodamiento de bolas	Rodamiento de bolas
Dirección de carga	Radial	Radial
Construcción	Fila única	Fila única
Rango de temperatura	-115° a 400°C	-115° a 800°C
Peso	0,0040 kilogramos	0,0021 kilos
Dimensión del producto		
diámetro del agujero	10 milímetros	10 milímetros
Tolerancia del diámetro interior	-0,008 mm a 0	-0,008 mm a 0
Diámetro exterior	19 milímetros	19 milímetros
Tolerancia del diámetro exterior	-0,009 mm a 0	-0,009 mm a 0
Ancho	5mm	5mm
Tolerancia de ancho	-0,120 mm a 0	-0,120 mm a 0
Material		
Material del anillo	circonita	Nitruro de Silicio
Material de la bola	circonita	Nitruro de Silicio
Material de la jaula	PTFE	PTFE
Clasificación de carga básica		
Carga radial dinámica	0,515kN	0,431kN
Carga radial estática	0,253kN	0,209kN

ANEXO 3: MATRIZ DE CONSISTENCIA

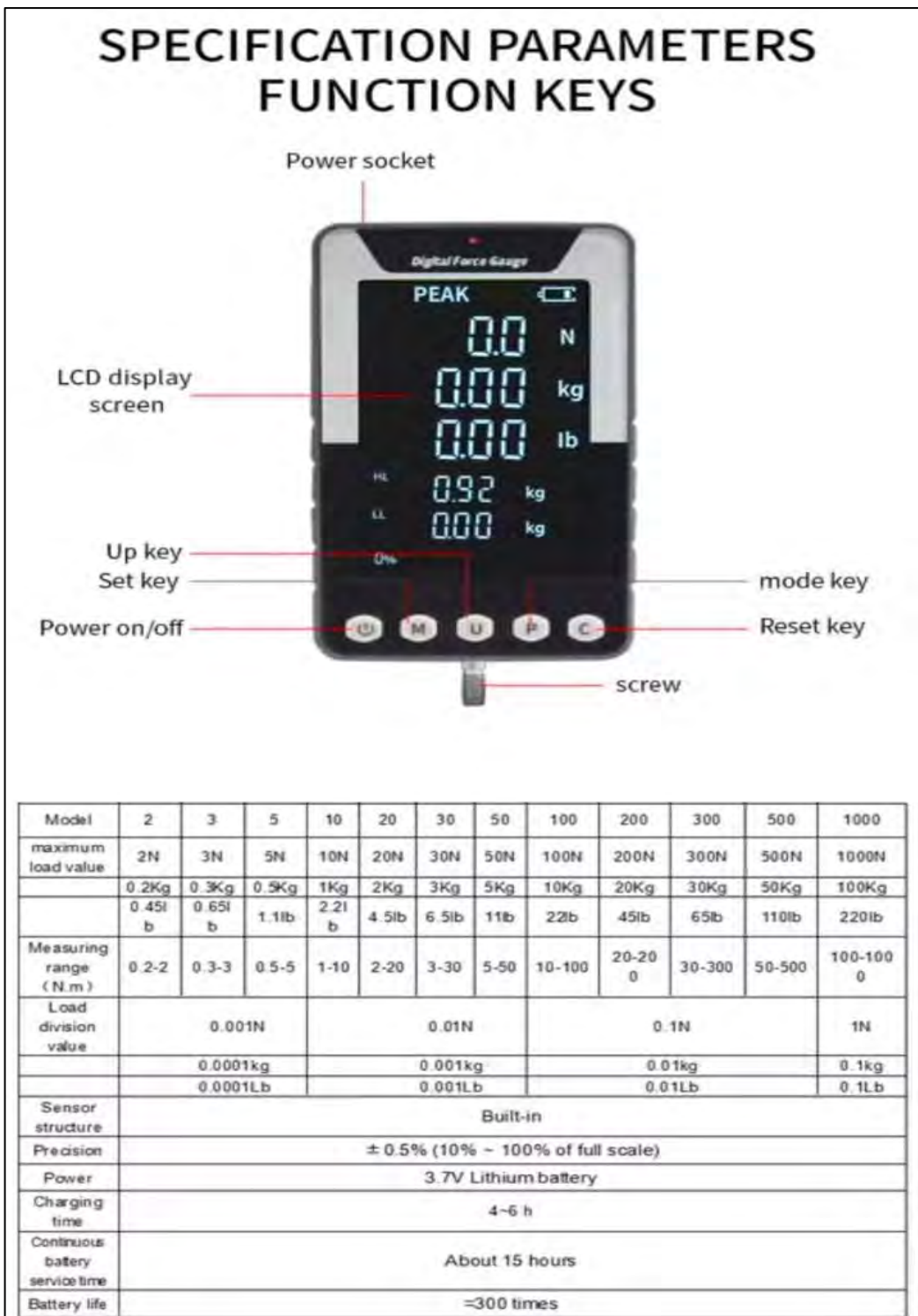
Autor: Vladimir Wilson Hanco

Título: “ANALISIS EXPERIMENTAL DE UN DISEÑO DE TURBINA EOLICA MEDIANTE EL USO DE UN TUNEL DE VIENTO”

Problema general	Objetivo general	Hipótesis general			
¿Cómo validar la funcionalidad y eficiencia aerodinámica del diseño de una turbina eólica mediante el uso del túnel de viento de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de la Unsaac?	Desarrollar el análisis experimental de un diseño de turbina eólica mediante el uso de un túnel de viento, para validar su eficiencia aerodinámica.	El análisis experimental del diseño de una turbina eólica mediante el uso de un túnel de viento, permitirá obtener una geometría, un coeficiente de potencia y par optimo bajo la condición de presión y vientos de la región. Asimismo, el análisis el análisis experimental permitirá validar su funcionalidad.		TIPO DE LA INVESTIGACION: Investigación Básica. ENFOQUE DE LA INVESTIGACION: Enfoque cuantitativo. NIVEL DE INVESTIGACION: Correlacional. DISEÑO DE LA INVESTIGACION: El diseño de la investigación será de tipo experimental. POBLACION Y MUESTRA: 3 turbinas eólicas. TECNICAS DE RECOLECCION DE DATOS: La técnica de recolección de datos será la empírica, que consiste en la observación directa del objeto de estudio y conocer su funcionamiento. Los instrumentos a utilizar serán: anemómetro, dispositivo medidor de torque (freno prony), sensor de tensión, tacómetro. TECNICAS DE ANALISIS DE DATOS: La técnica de análisis de datos será mediante pruebas estadísticas, paramétricas y descriptiva. Asimismo, se empleará el diseño factorial 3x4. Los datos obtenidos de las variables se describirán por medio de; frecuencias, medias y desviación estándar. La prueba de hipótesis se realizará mediante la ANOVA.	CAPITULO I: MARCO REFERENCIAL
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variables		CAPITULO II: MARCO TEORICO
¿De qué manera se pueden definir los parámetros hidráulicos de diseño de la turbina eólica?	Evaluar y determinar los parámetros de diseño hidráulico de la turbina eólica.	La evaluación y determinación de los parámetros de diseño hidráulico de la turbina hará posible un redimensionamiento del rotor de la turbina.	VI: Velocidad del viento. Diámetro de rotor Altura de rotor Longitud de cuerda Angulo Helicoidal VD: Coeficiente de potencia Potencia de la turbina.		CAPITULO III: DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DE DISEÑO GEOMETRICO
¿Cómo dimensionar la geometría y perfil alar de la turbina eólica?	Aplicar el diseño aerodinámico y un modelo matemático al rotor de la turbina eólica.	Al aplicar el diseño aerodinámico y un modelo matemático al rotor de la turbina, se obtendrá una geometría, un coeficiente de potencia y par optimo.	VI: Velocidad del viento. Diámetro de rotor Altura de rotor Longitud de cuerda Angulo Helicoidal VD: Coeficiente de potencia Potencia de la turbina.		CAPITULO IV. DESARROLLO DEL DISEÑO AERODINAMICO
¿Cómo dimensionar y obtener los componentes mecánicos de la turbina eólica?	Aplicar el diseño mecánico y fabricar los elementos que constituyen la turbina eólica.	Al aplicar el diseño mecánico y fabricar los elementos de la turbina eólica, se obtendrá los esfuerzos de diseño optimo y los materiales adecuados para la construcción de la turbina.	VI: Potencia mecánica Propiedades del material. VD: Esfuerzos de diseño.		CAPITULO V. DISEÑO MECANICO CAPITULO VI. ESPECIFICACIONES TECNICAS
¿Cómo validar la funcionalidad de la turbina eólica?	Analizar experimentalmente el comportamiento de la turbina eólica en un túnel de viento	Analizar experimentalmente el comportamiento de la turbina eólica hará posible validar el estudio.	VI: Velocidad del viento. Geometría de la turbina. VD: Coeficiente de potencia Coeficiente de par.		CAPITULO VII. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE ENSAYOS.
¿Cómo estimar el costo de implementación de la turbina eólica?	Desarrollar la evaluación económica de la turbina eólica	Desarrollar la evaluación económica de la turbina hará posible la estimación del costo de implementación.	VI: Costo de fabricación e instalación.		CAPITULO VIII. EVALUACION ECONOMICA.

ANEXO 4: FICHA TECNICA DE EQUIPOS UTILIZADOS PARA MEDICION DE PARAMETROS

1. SENSOR DE TENSION



2. ANEMÓMETRO DIGITAL SW816

CARACTERÍSTICA	ESPECIFICACIÓN
Modelo	Samin / Samwin SW816
Rango de velocidad	0 a 30 m/s
Resolución	0.1 m/s
Precisión	$\pm 3\% + 0.1$ m/s
Temperatura	-10°C a 45°C
Unidades	m/s, km/h, ft/min, mph, knots
Alimentación	Batería CR2032



3. TACÓMETRO LÁSER HABOTEST.

HABOTEST®

HT670 High-Precision Digital Tachometer



Product Parameters

Function	Range
Display	5-Digit 40mm LCD Display
Accuracy	$\pm(0.05\%+1)$
Range Selection	Auto Range
Effective Distance	1000mm
Measurement Range	Optical Speed Measurement Method: 10~99999rpm (revolutions Per Minute)
	Count Measurement Method: 1~99999r (revolutions)
Resolution	Laser speed measurement: 0.1 rpm (10~9999.9 rpm) 1 rpm (10000 rpm and above)
	Counting Measurement: (1~99999 r)
Auto Shutdown	Automatically Shuts Off After Approximately 15 Minutes Of Inactivity.
Power Supply	3 × 1.5V AAA Batteries (Batteries are not included in the product package.)
Power Consumption	Approximately 50 mA
Size	142 × 58 × 27.5 mm
Weight	Approximately 118.5 g

ANEXO 5: ALGORITMO COMPUTACIONAL

```

clear all
close all
clc
%% =====
%% DATOS AERODINAMICOS DEL PERFIL ALAR
%% =====
[alpha_data, Cl_data, Cd_data] = datos_aerodinamicos_excel();
%% Parametros geometricos
R = 0.0925;      % Radio del rotor [m]
H = 0.185;      % Altura del rotor [m]
c = 0.04;       % Longitud de cuerda [m]
N = 3;          % Numero de palas
Psi = pi/3;     % Angulo helicoidal [rad]
%% Parametros operacionales
Vinf = 3;       % Velocidad libre del viento [m/s]
rho = 0.823;    % Densidad del aire [kg/m^3]
v = 2.1745e-5;  % Viscosidad cinematica [m^2/s]
%% Discretizacion
dtheta = pi/12;
%% Barrido de TSR para curva Cp vs TSR
TSR_vec = linspace(0, 2.4, 25);
Cp_vec = zeros(size(TSR_vec));
P_vec = zeros(size(TSR_vec));
w_vec = zeros(size(TSR_vec));
for i = 1:length(TSR_vec)
    w_vec(i) = TSR_vec(i)*Vinf/R;
    [Cp_vec(i), P_vec(i)] =
    calcular_CP_DMS(R,H,c,N,Psi,Vinf,w_vec(i),rho,v,dtheta, ...
                    alpha_data,Cl_data,Cd_data);
end
%% Tabla TSR vs Cp
Tabla_Cp_TSR = table(TSR_vec', w_vec', Cp_vec', P_vec', ...
    'VariableNames', {'TSR','Omega_rad_s','Cp','Potencia_W'});
disp('----- TABLA TSR VS Cp -----')
disp(Tabla_Cp_TSR)
%% Grafica Cp vs TSR
figure
plot(TSR_vec, Cp_vec, 'o-', 'LineWidth', 1.8, 'MarkerSize', 6)
grid on
xlabel('TSR')
ylabel('Cp')
title('Cp vs TSR (c=0.04m)')
%% =====
%% FUNCION PRINCIPAL DMST
%% =====
function [Cp, P_total] = calcular_CP_DMS(R,H,c,N,Psi,Vinf,w,rho,v,dtheta, ...
alpha_data,Cl_data,Cd_data)
Nh = round(pi/dtheta);
Nv = round(Psi/dtheta);
dh = H/Nh;
ntheta = 20;
TSR = w*R/Vinf;
Qup = zeros(Nh,ntheta);

```

```

Qdw = zeros(Nh,ntheta);

tol = 1e-4;
maxIter = 100;
relax = 0.35;
for z = 1:Nh
    for k = 1:ntheta
        %% ----- Corriente arriba -----
        theta = -pi/2 + (k-1)*pi/(ntheta-1);
        au = 1;
        for iter = 1:maxIter
            Vau = max(au*Vinf, 1e-8);
            Wup = Vinf * sqrt((TSR + au*sin(theta))^2 + ...
                (au*cos(theta))^2);
            alfaup = atan2(au*cos(theta), TSR + au*sin(theta));
            alfa_deg = rad2deg(alfaup);
            [Cl, Cd] = obtener_ClCd(alpha_data, Cl_data, Cd_data, alfa_deg);
            Cn = Cl*cos(alfaup) + Cd*sin(alfaup);
            Ct = Cl*sin(alfaup) - Cd*cos(alfaup);
            Fup = (N*c/(8*pi*R)) * (Wup/Vau)^2 * ...
                (Cn*cos(theta) - Ct*sin(theta));
            fup = max(Fup*pi, 0);
            au_new = pi/(pi + fup);
            au_new = max(min(au_new, 1), 0.05);
            au_new = (1-relax)*au + relax*au_new;
            if abs(au_new - au) < tol
                au = au_new;
                break
            end
            au = au_new;
        end
        Qup(z,k) = 0.5 * Ct * rho * c * R * dh * Wup^2;
        %% ----- Corriente abajo -----
        thetaa = pi/2 + (k-1)*pi/(ntheta-1);
        ad = au;
        for iter = 1:maxIter
            factor_estela = max(2*au - 1, 0.05);
            Vad = max(ad*factor_estela*Vinf, 1e-8);
            Wdw = Vinf * sqrt((TSR + ad*factor_estela*sin(thetaa))^2 + ...
                (ad*factor_estela*cos(thetaa))^2);
            alfadw = atan2(ad*factor_estela*cos(thetaa), ...
                TSR + ad*factor_estela*sin(thetaa));
            alfa_dw_deg = rad2deg(alfadw);
            [Cll, Cdd] = obtener_ClCd(alpha_data, Cl_data, Cd_data, alfa_dw_deg);
            Cnn = Cll*cos(alfadw) + Cdd*sin(alfadw);
            Ctt = Cll*sin(alfadw) - Cdd*cos(alfadw);
            Fdw = (N*c/(8*pi*R)) * (Wdw/Vad)^2 * ...
                (Cnn*cos(thetaa) - Ctt*sin(thetaa));
            fdw = max(Fdw*pi, 0);
            ad_new = pi/(pi + fdw);
            ad_new = max(min(ad_new, 1), 0.05);
            ad_new = (1-relax)*ad + relax*ad_new;
            if abs(ad_new - ad) < tol
                ad = ad_new;
                break
            end
            ad = ad_new;
        end
    end
end

```

```

end
Qdw(z,k) = 0.5 * Ctt * rho * c * R * dh * Wdw^2;
end
end
%% Torque promedio del rotor
Q_total = N * sum(mean(Qup + Qdw, 2));
%% Potencia
P_total = Q_total * w;
%% Area barrida del rotor Darrieus
A = 2*R*H;
%% Coeficiente de potencia
Cp = P_total / (0.5*rho*A*Vinf^3);
%% Proteccion numerica
if isnan(Cp) || isinf(Cp)
Cp = 0;
P_total = 0;
end
end
%% =====
%% INTERPOLACION DE Cl Y Cd DESDE LOS DATOS DEL PERFIL ALAR
%% =====
function [Cl, Cd] = obtener_ClCd(alpha_data,Cl_data,Cd_data,alpha_deg)
% Lleva el angulo al rango del Excel: -180 a 180 grados
alpha_deg = mod(alpha_deg + 180, 360) - 180;
% Interpolacion lineal con los valores reales del Excel
Cl = interp1(alpha_data, Cl_data, alpha_deg, 'linear', 'extrap');
Cd = interp1(alpha_data, Cd_data, alpha_deg, 'linear', 'extrap');
end
%% =====
%% Columnas: Angle of Attack [deg], Lift Coefficient Cl, Drag Coefficient Cd
%% =====
function [alpha_data, Cl_data, Cd_data] = datos_aerodinamicos_excel()
alpha_data = [
-180; -179; -178; -177; -176; -175; -174; -173;
-172; -171; -170; -169; -168; -167; -166; -165;
-164; -163; -162; -161; -160; -159; -158; -157;
-156; -155; -154; -153; -152; -151; -150; -149;
-148; -147; -146; -145; -144; -143; -142; -141;
-140; -139; -138; -137; -136; -135; -134; -133;
-132; -131; -130; -129; -128; -127; -126; -125;
-124; -123; -122; -121; -120; -119; -118; -117;
-116; -115; -114; -113; -112; -111; -110; -109;
-108; -107; -106; -105; -104; -103; -102; -101;
-100; -99; -98; -97; -96; -95; -94; -93;
-92; -91; -90; -89; -88; -87; -86; -85;
-84; -83; -82; -81; -80; -79; -78; -77;
-76; -75; -74; -73; -72; -71; -70; -69;
-68; -67; -66; -65; -64; -63; -62; -61;
-60; -59; -58; -57; -56; -55; -54; -53;
-52; -51; -50; -49; -48; -47; -46; -45;
-44; -43; -42; -41; -40; -39; -38; -37;
-36; -35; -34; -33; -32; -31; -30; -29;
-28; -27; -26; -25; -24; -23; -22; -21;
-20; -19; -18; -17; -16; -15; -14; -13.5;
-13; -12.5; -11.5; -11; -10.5; -10; -9.5; -9;
-8.5; -8; -7.5; -7; -6.5; -6; -5.5; -5;
-4.5; -4; -3.5; -3; -2.5; -2; -1.5; -1;

```

```

-0.5; 0; 0.5; 1; 1.5; 2; 2.5; 3;
3.5; 4; 4.5; 5; 5.5; 6; 6.5; 7;
7.5; 8; 8.5; 9; 9.5; 10; 10.5; 11;
11.5; 12.5; 13; 13.5; 14; 15; 15.5; 16;
16.5; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23;
24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31;
32; 33; 34; 35; 36; 37; 38; 39;
40; 41; 42; 43; 44; 45; 46; 47;
48; 49; 50; 51; 52; 53; 54; 55;
56; 57; 58; 59; 60; 61; 62; 63;
64; 65; 66; 67; 68; 69; 70; 71;
72; 73; 74; 75; 76; 77; 78; 79;
80; 81; 82; 83; 84; 85; 86; 87;
88; 89; 90; 91; 92; 93; 94; 95;
96; 97; 98; 99; 100; 101; 102; 103;
104; 105; 106; 107; 108; 109; 110; 111;
112; 113; 114; 115; 116; 117; 118; 119;
120; 121; 122; 123; 124; 125; 126; 127;
128; 129; 130; 131; 132; 133; 134; 135;
136; 137; 138; 139; 140; 141; 142; 143;
144; 145; 146; 147; 148; 149; 150; 151;
152; 153; 154; 155; 156; 157; 158; 159;
160; 161; 162; 163; 164; 165; 166; 167;
168; 169; 170; 171; 172; 173; 174; 175;
176; 177; 178; 179; 180;
];
Cl_data = [
2.2109678e-16; 0.031504679; 0.062970974; 0.094360545; 0.12563516;
0.1567567; 0.18768726; 0.21838915;
0.24882497; 0.27895764; 0.30875042; 0.33816707; 0.3671717; 0.39572898;
0.42380413; 0.45136294;
0.47837183; 0.50479788; 0.53060895; 0.55577356; 0.58026099; 0.60404152;
0.6270861; 0.64936668;
0.67085606; 0.69152814; 0.71135771; 0.73032057; 0.74839365; 0.76555496;
0.78178352; 0.79705966;
0.81136465; 0.8246811; 0.83699286; 0.84828484; 0.85854334; 0.86775583;
0.87591106; 0.88299912;
0.88901144; 0.89394063; 0.89778066; 0.90052688; 0.90217596; 0.90272588;
0.90217596; 0.90052688;
0.89778066; 0.89394063; 0.88901144; 0.88299912; 0.87591106; 0.86775583;
0.85854334; 0.84828484;
0.83699286; 0.8246811; 0.81136465; 0.79705966; 0.78178352; 0.76555496;
0.74839365; 0.73032057;
0.71135771; 0.69152814; 0.67085606; 0.64936668; 0.6270861; 0.60404152;
0.58026099; 0.55577356;
0.53060895; 0.50479788; 0.47837183; 0.45136294; 0.42380413; 0.39572898;
0.3671717; 0.33816707;
0.30875042; 0.27895764; 0.24882497; 0.21838915; 0.18768726; 0.1567567;
0.12563516; 0.094360545;
0.062970974; 0.031504679; -1.1021457e-16; -0.031448416; -0.062936321; -
0.094425574; -0.12587816; -0.15725626;
-0.18852229; -0.21963894; -0.25056925; -0.28127661; -0.31172484; -
0.34187824; -0.37170163; -0.40116036;
-0.43022045; -0.45884851; -0.48701188; -0.5146786; -0.54181761; -
0.56839859; -0.59439206; -0.61976963;
-0.64450359; -0.66856754; -0.69193596; -0.71458447; -0.73648971; -
0.75762969; -0.77798349; -0.79753149;

```

-0.81625533; -0.83413804; -0.85116404; -0.86731905; -0.88259047; -
 0.89696693; -0.9104389; -0.92299825;
 -0.93463856; -0.94535518; -0.95514506; -0.96400708; -0.97194201; -
 0.97895241; -0.98504311; -0.99022073;
 -0.99449438; -0.99787515; -1.0003768; -1.0020154; -1.0028098; -1.0027817;
 -1.0019559; -1.0003601;
 -0.99802601; -0.9949888; -0.99128789; -0.9869675; -0.9820767; -0.97667038;
 -0.97081; -0.96456414;
 -0.95800996; -0.95123422; -0.94433522; -0.93742454; -0.93062961; -
 0.92409718; -0.91799706; -0.91252756;
 -0.90792233; -0.90445948; -0.90247327; -0.90237087; -0.90465432; -
 0.90995228; -0.78030002; -0.76239997;
 -0.81809998; -0.82279998; -0.96619999; -0.93419999; -0.92699999; -
 0.92699999; -0.8987; -0.87639999;
 -0.84069997; -0.81169999; -0.78320003; -0.75190002; -0.72079998; -
 0.68900001; -0.65719998; -0.6214;
 -0.5873; -0.5503; -0.51340002; -0.477; -0.4339; -0.38690001; -0.3283; -
 0.25060001;
 -0.14569999; 0; 0.14569999; 0.25049999; 0.3283; 0.38690001; 0.4339; 0.477;
 0.5133; 0.5503; 0.58719999; 0.6214; 0.65710002; 0.68900001; 0.72079998;
 0.75190002;
 0.78320003; 0.8118; 0.84069997; 0.87639999; 0.89880002; 0.9271;
 0.92720002; 0.93510002;
 0.91549999; 0.82319999; 0.81830001; 0.76289999; 0.78070003; 0.78939998;
 0.79070002; 0.82319999;
 0.82569999; 0.87363935; 0.87558699; 0.87923634; 0.88420749; 0.89018792;
 0.8969177; 0.90417784;
 0.91178238; 0.91957182; 0.92740828; 0.93517166; 0.94275671; 0.9500708;
 0.95703179; 0.96356672;
 0.96961051; 0.97510505; 0.97999805; 0.98424298; 0.98779786; 0.99062514;
 0.99269134; 0.99396646;
 0.99442405; 0.99404061; 0.99279559; 0.99067116; 0.98765212; 0.98372567;
 0.9788813; 0.97311074;
 0.96640784; 0.95876861; 0.95019072; 0.94067413; 0.93022031; 0.91883266;
 0.90651625; 0.89327788;
 0.87912589; 0.86407024; 0.84812242; 0.83129549; 0.8136037; 0.79506302;
 0.77569062; 0.75550491;
 0.7345258; 0.71277428; 0.69027257; 0.6670441; 0.64311337; 0.61850601;
 0.59324861; 0.56736887;
 0.54089534; 0.51385754; 0.48628587; 0.45821148; 0.4296664; 0.40068334;
 0.37129569; 0.34153756;
 0.3114436; 0.28104901; 0.25038958; 0.2195015; 0.18842137; 0.15718623;
 0.12583336; 0.094400384;
 0.06292513; 0.031445619; 1.1021457e-16; -0.031409547; -0.062780827; -
 0.094075613; -0.12525579; -0.15628335;
 -0.18712051; -0.2177297; -0.24807361; -0.2781153; -0.30781811; -
 0.33714592; -0.36606297; -0.39453402;
 -0.42252439; -0.44999999; -0.47692734; -0.50327361; -0.52900672; -
 0.55409533; -0.57850885; -0.60221756;
 -0.62519252; -0.6474058; -0.66883034; -0.68943995; -0.70920968; -
 0.72811526; -0.7461338; -0.76324326;
 -0.77942282; -0.79465282; -0.8089146; -0.82219088; -0.83446544; -
 0.84572333; -0.85595083; -0.86513549;
 -0.8732661; -0.88033283; -0.88632697; -0.89124125; -0.89506966; -
 0.8978076; -0.89945173; -0.89999998;
 -0.89945173; -0.8978076; -0.89506966; -0.89124125; -0.88632697; -
 0.88033283; -0.8732661; -0.86513549;

```

-0.85595083; -0.84572333; -0.83446544; -0.82219088; -0.8089146; -
0.79465282; -0.77942282; -0.76324326;
-0.7461338; -0.72811526; -0.70920968; -0.68943995; -0.66883034; -
0.6474058; -0.62519252; -0.60221756;
-0.57850885; -0.55409533; -0.52900672; -0.50327361; -0.47692734; -
0.44999999; -0.42252439; -0.39453402;
-0.36606297; -0.33714592; -0.30781811; -0.2781153; -0.24807361; -
0.2177297; -0.18712051; -0.15628335;
-0.12525579; -0.094075613; -0.062780827; -0.031409547; -2.2042914e-16;
];

```

```

Cd_data = [
0.00600000001; 0.0065482557; 0.0081923548; 0.010930294; 0.014758738;
0.019673022; 0.025667159; 0.032733846;
0.040864471; 0.050049134; 0.060276639; 0.071534529; 0.083809085;
0.097085357; 0.11134716; 0.12657714;
0.14275672; 0.15986618; 0.1778847; 0.19679032; 0.21655999; 0.23716965;
0.25859419; 0.28080747;
0.30378243; 0.32749113; 0.35190466; 0.37699327; 0.40272638; 0.42907265;
0.456; 0.4834756;
0.51146597; 0.53993702; 0.56885403; 0.59818184; 0.62788469; 0.65792638;
0.68827027; 0.71887946;
0.74971664; 0.78074419; 0.81192434; 0.84321916; 0.87459046; 0.90599996;
0.93740952; 0.96878082;
1.0000756; 1.0312557; 1.0622833; 1.0931205; 1.1237297; 1.1540736;
1.1841153; 1.2138181;
1.2431459; 1.2720629; 1.300534; 1.3285244; 1.3559999; 1.3829273;
1.4092736; 1.4350067;
1.4600953; 1.4845088; 1.5082175; 1.5311925; 1.5534058; 1.5748303;
1.5954399; 1.6152096;
1.6341152; 1.6521338; 1.6692432; 1.6854228; 1.7006528; 1.7149146;
1.7281909; 1.7404654;
1.7517233; 1.7619509; 1.7711354; 1.7792661; 1.7863328; 1.7923269;
1.7972412; 1.8010696;
1.8038076; 1.8054518; 1.8; 1.7994083; 1.7977209; 1.7949396; 1.7910678;
1.7861104;
1.780073; 1.7729633; 1.7647896; 1.7555621; 1.7452917; 1.7339913;
1.7216741; 1.7083555;
1.6940515; 1.6787796; 1.6625582; 1.6454071; 1.6273472; 1.6084005;
1.5885899; 1.5679396;
1.5464747; 1.5242213; 1.5012066; 1.4774585; 1.4530058; 1.4278783;
1.4021068; 1.3757223;
1.3487573; 1.3212442; 1.2932169; 1.2647092; 1.235756; 1.2063925;
1.1766543; 1.1465778;
1.1161995; 1.0855563; 1.0546857; 1.0236251; 0.99241245; 0.96108568;
0.92968297; 0.89824247;
0.86680251; 0.83540136; 0.80407727; 0.77286834; 0.74181259; 0.71094787;
0.68031168; 0.64994133;
0.61987388; 0.59014583; 0.56079346; 0.53185248; 0.50335813; 0.47534508;
0.44784746; 0.42089877;
0.39453179; 0.36877865; 0.3436707; 0.31923848; 0.29551181; 0.27251953;
0.25028965; 0.22884922;
0.20822437; 0.1884402; 0.16952083; 0.15148926; 0.13436747; 0.1181763;
0.13146999; 0.12356;
0.10196; 0.092560001; 0.069109999; 0.064929999; 0.05982; 0.054540001;
0.050969999; 0.04738;

```

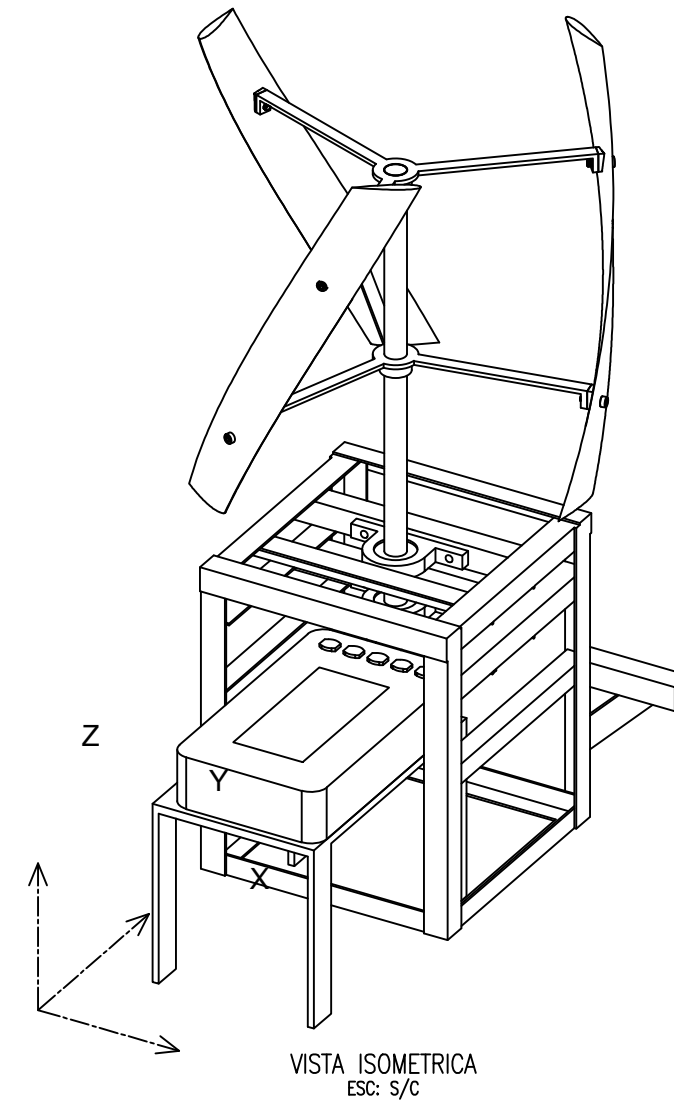
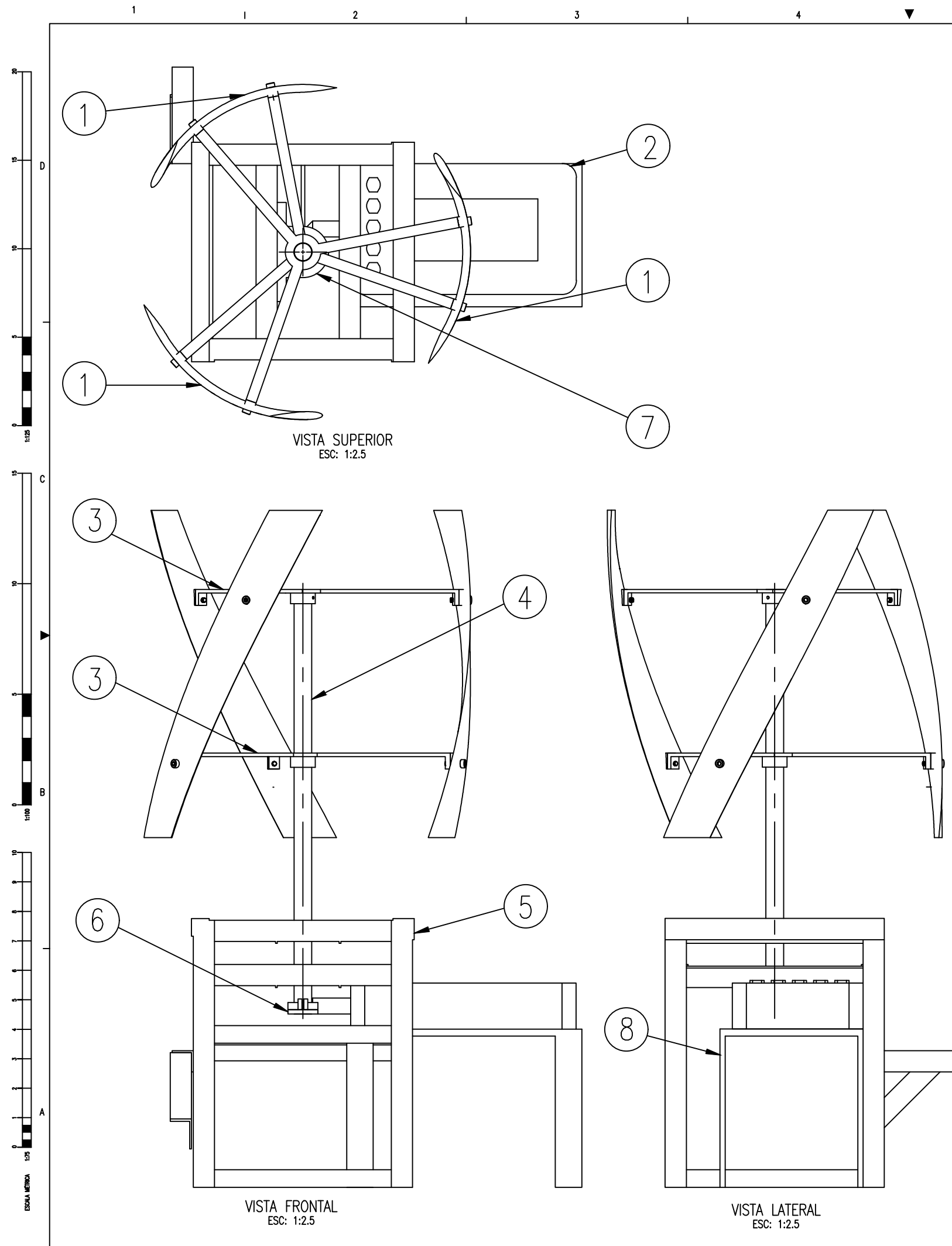
```

    0.044849999; 0.04228; 0.040059999; 0.0383; 0.036809999; 0.035610002;
0.034630001; 0.0341;
    0.033670001; 0.033629999; 0.033860002; 0.03441; 0.035519999; 0.037110001;
0.039450001; 0.042720001;
    0.046980001; 0.050080001; 0.046969999; 0.042709999; 0.039450001;
0.037110001; 0.03551; 0.034400001;
    0.033860002; 0.033629999; 0.033670001; 0.0341; 0.034630001; 0.035610002;
0.036809999; 0.038290001;
    0.04005; 0.04228; 0.044849999; 0.047389999; 0.050980002; 0.05455; 0.05982;
0.064900003;
    0.071500003; 0.092610002; 0.10206; 0.12367; 0.13163; 0.15798999;
0.17321999; 0.20871;
    0.20489; 0.15324803; 0.17126994; 0.19017914; 0.20995258; 0.23056619;
0.25199485; 0.27421245;
    0.29719195; 0.3209053; 0.34532368; 0.37041733; 0.39615566; 0.42250732;
0.44944021; 0.47692153;
    0.5049178; 0.53339487; 0.56231815; 0.59165239; 0.62136173; 0.65141016;
0.68176091; 0.71237713;
    0.74322146; 0.77425635; 0.805444; 0.83674639; 0.8681255; 0.89954293;
0.93096054; 0.96234;
    0.99364311; 1.0248317; 1.0558679; 1.0867137; 1.1173317; 1.1476846;
1.1777353; 1.2074474;
    1.2367845; 1.2657109; 1.2941915; 1.3221915; 1.3496768; 1.376614;
1.4029702; 1.4287133;
    1.453812; 1.4782357; 1.5019547; 1.52494; 1.5471637; 1.5685987; 1.589219;
1.6089993;
    1.6279155; 1.6459448; 1.6630651; 1.6792556; 1.6944965; 1.7087692;
1.7220565; 1.7343421;
    1.7456111; 1.7558497; 1.7650455; 1.7731874; 1.7802653; 1.7862706;
1.7911962; 1.7950358;
    1.797785; 1.7994405; 1.8; 1.8054518; 1.8038076; 1.8010696; 1.7972412;
1.7923269;
    1.7863328; 1.7792661; 1.7711354; 1.7619509; 1.7517233; 1.7404654;
1.7281909; 1.7149146;
    1.7006528; 1.6854228; 1.6692432; 1.6521338; 1.6341152; 1.6152096;
1.5954399; 1.5748303;
    1.5534058; 1.5311925; 1.5082175; 1.4845088; 1.4600953; 1.4350067;
1.4092736; 1.3829273;
    1.3559999; 1.3285244; 1.300534; 1.2720629; 1.2431459; 1.2138181;
1.1841153; 1.1540736;
    1.1237297; 1.0931205; 1.0622833; 1.0312557; 1.0000756; 0.96878082;
0.93740952; 0.90599996;
    0.87459046; 0.84321916; 0.81192434; 0.78074419; 0.74971664; 0.71887946;
0.68827027; 0.65792638;
    0.62788469; 0.59818184; 0.56885403; 0.53993702; 0.51146597; 0.4834756;
0.456; 0.42907265;
    0.40272638; 0.37699327; 0.35190466; 0.32749113; 0.30378243; 0.28080747;
0.25859419; 0.23716965;
    0.21655999; 0.19679032; 0.1778847; 0.15986618; 0.14275672; 0.12657714;
0.11134716; 0.097085357;
    0.083809085; 0.071534529; 0.060276639; 0.050049134; 0.040864471;
0.032733846; 0.025667159; 0.019673022;
    0.014758738; 0.010930294; 0.0081923548; 0.0065482557; 0.0060000001;
];

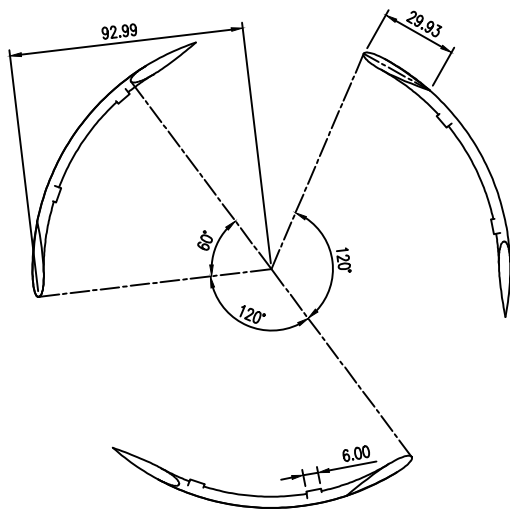
```

end

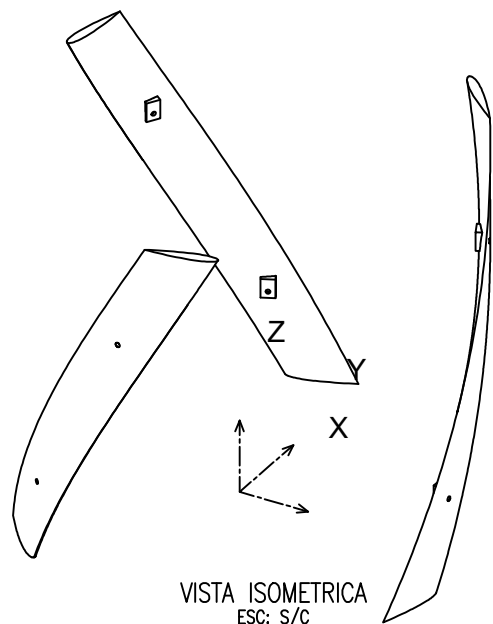
ANEXO 6: PLANOS



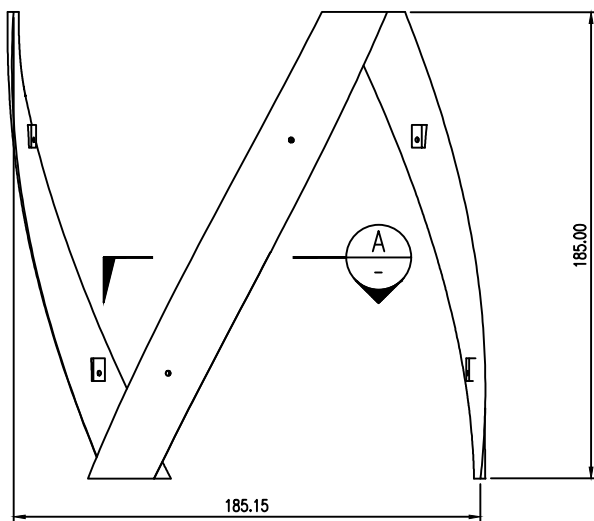
8	1	MESA SOPORTE DE SENSOR	MDF	-
7	1	SOPORTE TIPO CHUMACERA	ALUMINIO	PLANO N°06
6	1	FRENO PRONY	PLA	-
5	1	ESTRUCTURA SOPORTE DE TURBINA	ALUMINIO	PLANO N°05
4	1	EJE HUECO	ASTM A36	PLANO N°04
3	2	BRAZO (SOPORTE DE PALA)	PLA	PLANO N°03
2	1	SENSOR DE TENSION	-	-
1	3	PALA DARRIEUS HELICOIDAL	RESINA	PLANO N°02
POS.	CAN.	DESCRIPCION	MATERIAL	OBSERVACION
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y MECÁNICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA				
MÉTODO DE PROYECCIÓN:		TESIS:		ESCALA:
		"ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE UN DISEÑO DE TURBINA EOLICA MEDIANTE EL USO DE UN TUNEL DE VIENTO"		1:2.5
		PLANO:		FECHA:
		LISTA DE ELEMENTOS		16/11/25
RESPONSABLES:		Bach. WILSON HANCCO, Vladimir		FORMATO:
ASESOR:		Dr. Ing. SEQUEIROS PEREZ, Efrain Walter		A3
				HOJA:
				01



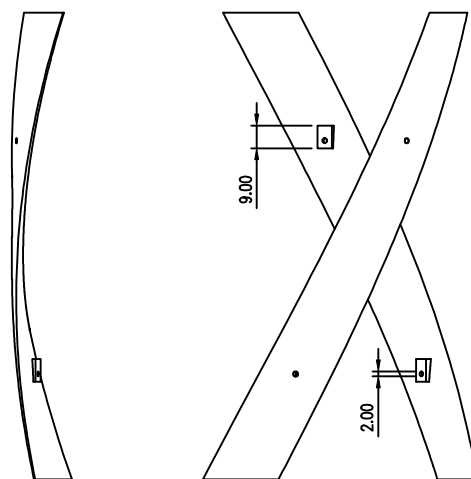
VISTA SUPERIOR
ESC: 1:3



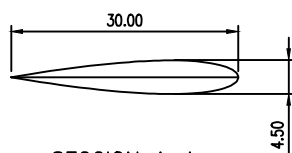
VISTA ISOMETRICA
ESC: S/C



VISTA FRONTAL
ESC: 1:3



VISTA LATERAL
ESC: 1:3

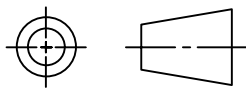


SECCION A-A
ESC: 1:1

NOTA: El perfil alar corresponde a un NACA 0015 con cuerda de 30mm.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y MECÁNICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN:



TESIS:

"ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE UN DISEÑO DE TURBINA EOLICA
MEDIANTE EL USO DE UN TUNEL DE VIENTO"

ESCALA:

1:3

PLANO:

PALA DARRIEUS HELICOIDAL

FECHA:

28/05/26

RESPONSABLES:

Bach. WILSON HANCCO, Vladimir

FORMATO:

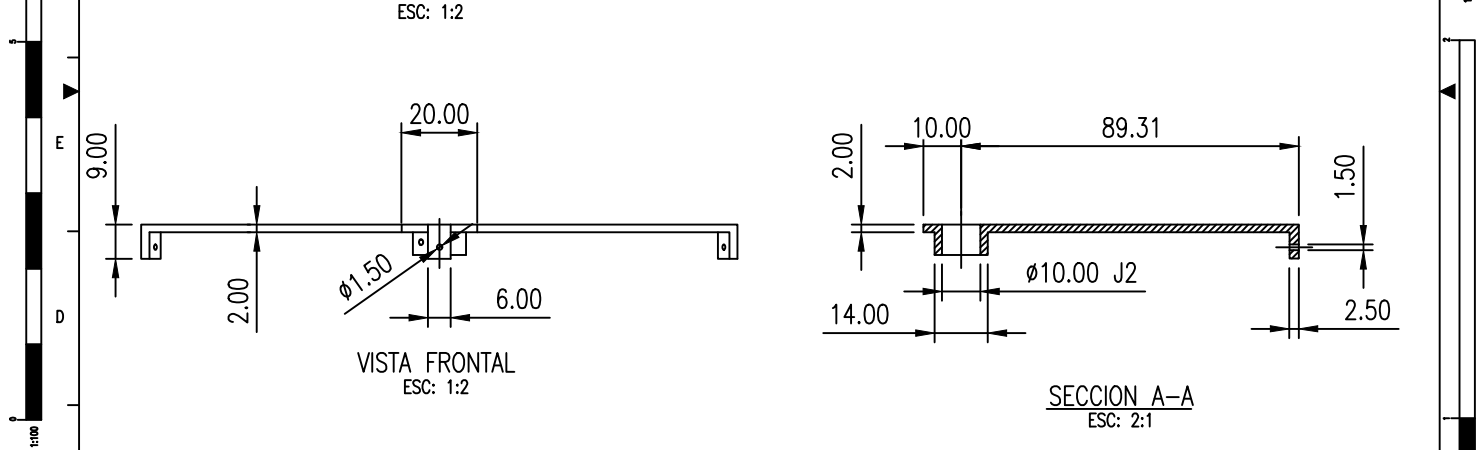
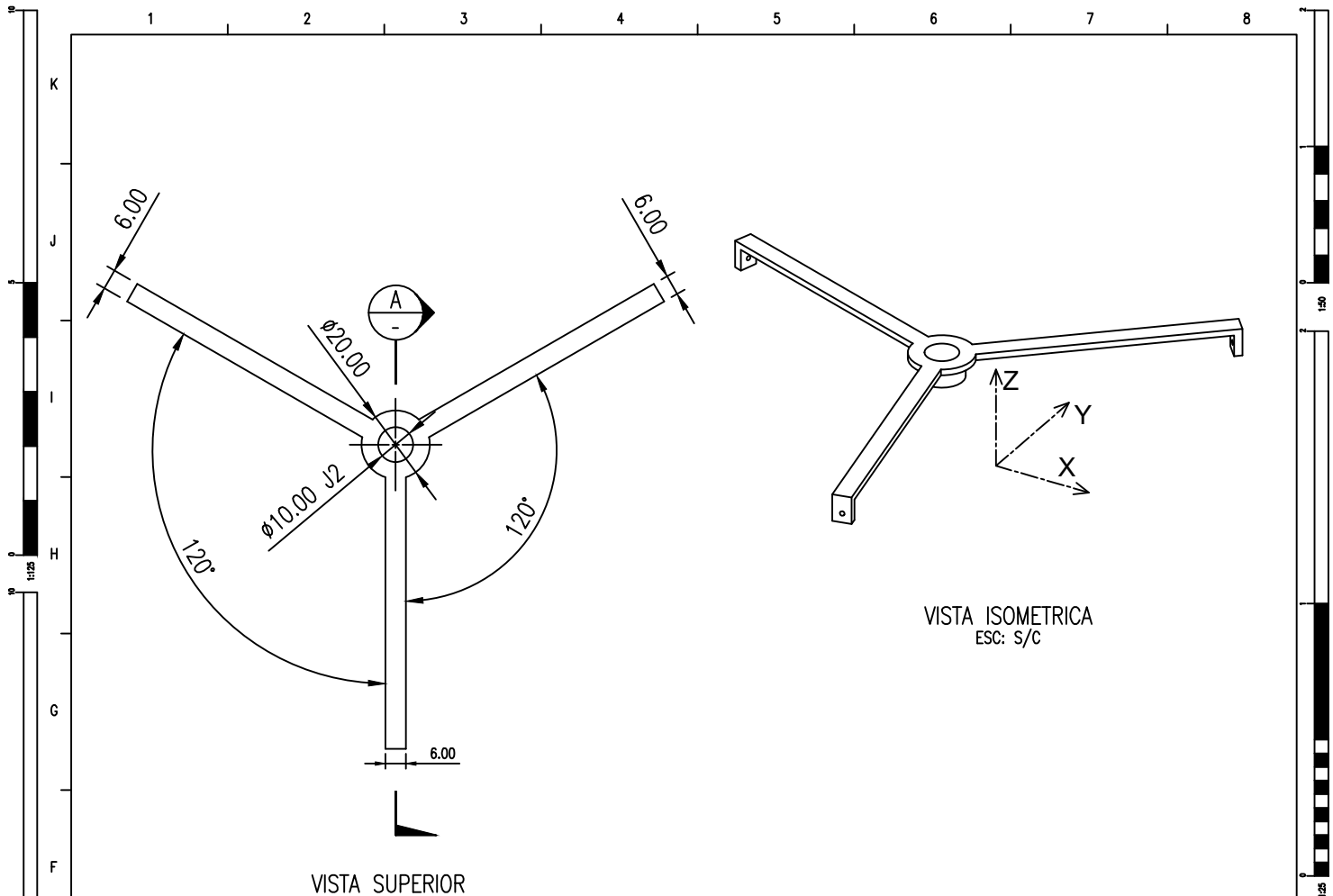
A4

ASESOR:

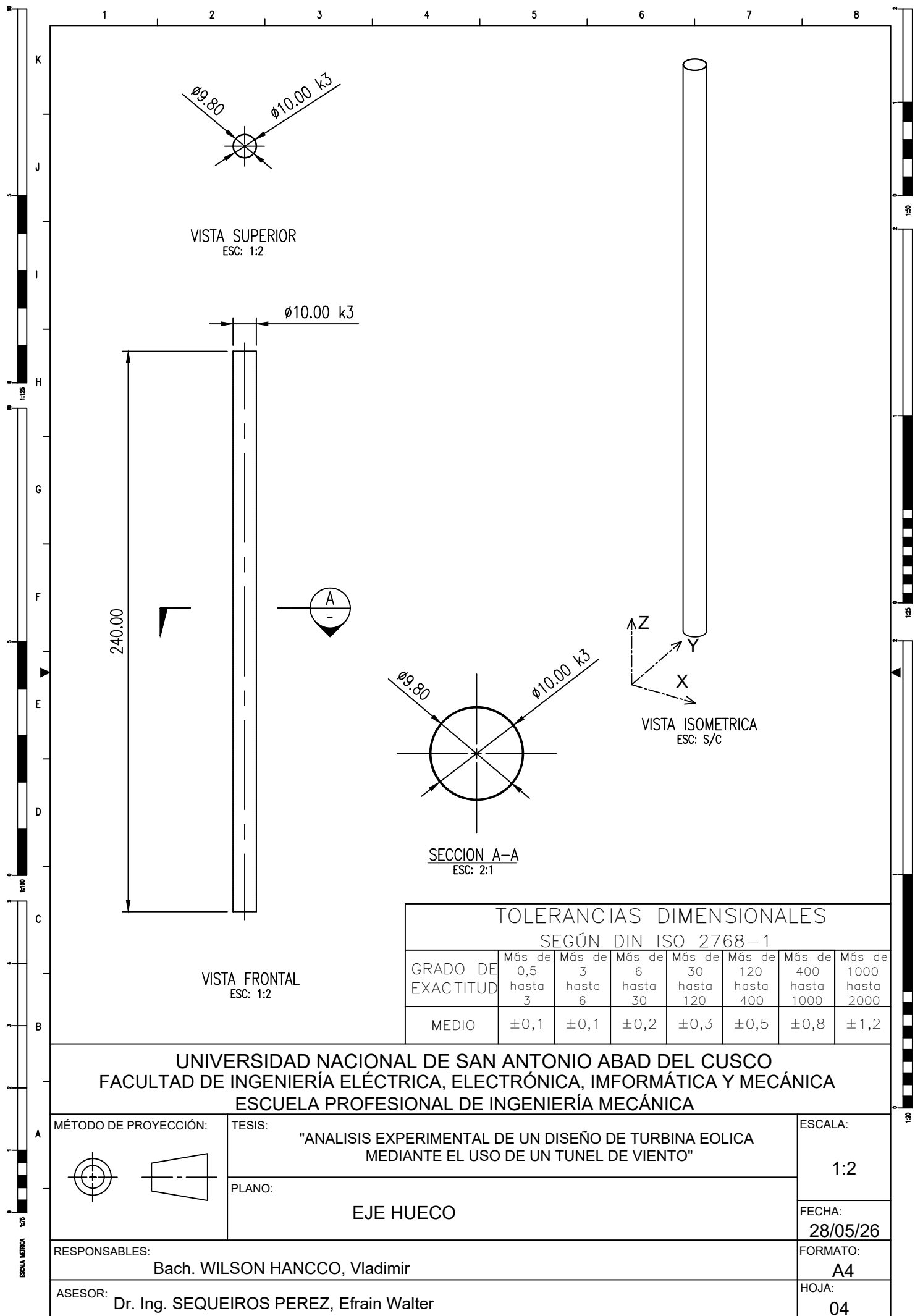
Dr. Ing. SEQUEIROS PEREZ, Efrain Walter

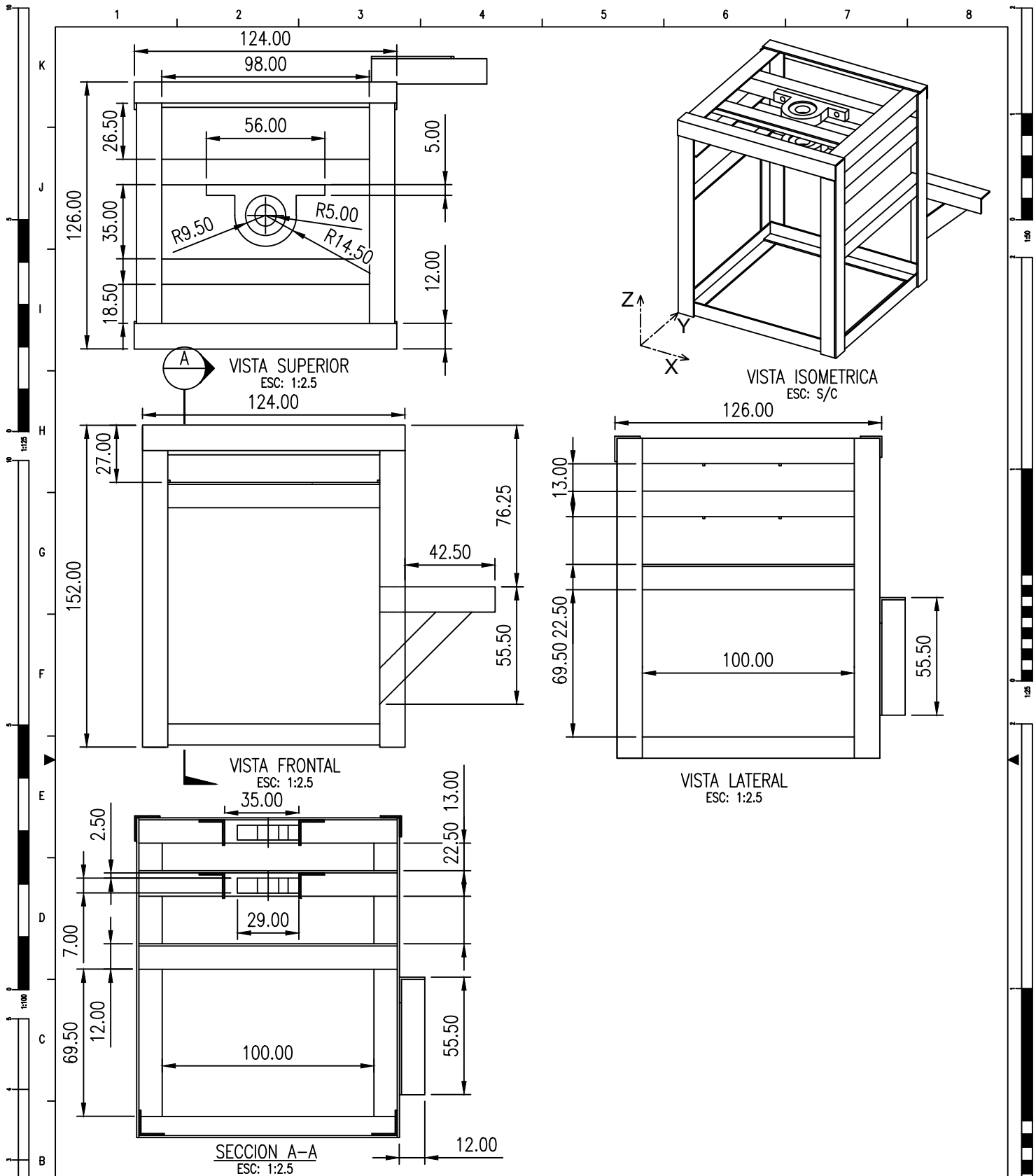
HOJA:

02



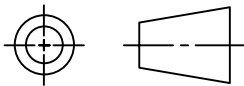
</





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y MECÁNICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN:



TESIS:

"ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE UN DISEÑO DE TURBINA EOLICA
 MEDIANTE EL USO DE UN TUNEL DE VIENTO"

ESCALA:

1:4

PLANO:

ESTRUCTURA SOPORTE DE TURBINA

FECHA:

28/05/26

RESPONSABLES:

Bach. WILSON HANCCO, Vladimir

FORMATO:

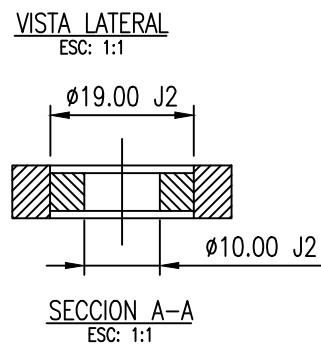
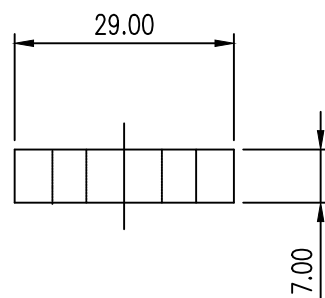
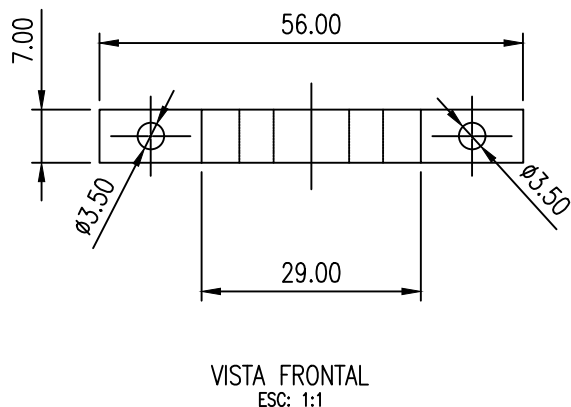
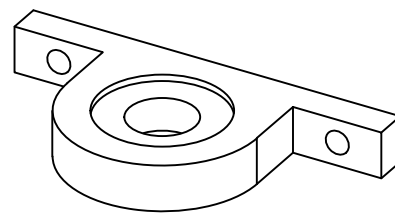
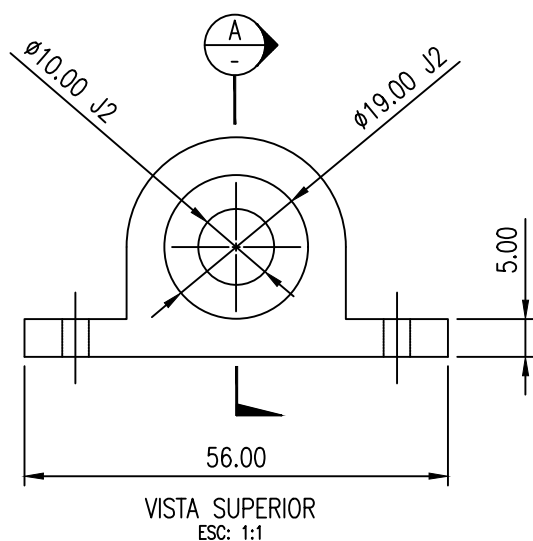
A4

ASESOR:

Dr. Ing. SEQUEIROS PEREZ, Efrain Walter

HOJA:

05



TOLERANCIAS DIMENSIONALES

SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y MECÁNICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN: 	TESIS: "ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE UN DISEÑO DE TURBINA EOLICA MEDIANTE EL USO DE UN TUNEL DE VIENTO"	ESCALA: 1:1
	PLANO: SOPORTE TIPO CHUMACERA	FECHA: 28/05/26
RESPONSABLES: Bach. WILSON HANCCO, Vladimir		FORMATO: A4
ASESOR: Dr. Ing. SEQUEIROS PEREZ, Efrain Walter		HOJA: 06