

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS
RENOVABLES**



**"ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE DOCE TIPOS DE
PERFILES AERODINÁMICOS NACA EN TÚNEL DE VIENTO BAJO
CONDICIONES DE VIENTO VARIABLE Y ESTABLE EN LA
EPIER-SEDE AYABACAS"**

Bach. Claudia Mirella Benavides Quispe

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES**

Asesor: M.Sc. Armando Antonio Salinas Del Carpio



Juliaca – Perú

2025



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS
RENOVABLES**



**"ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE DOCE TIPOS DE
PERFILES AERODINÁMICOS NACA EN TÚNEL DE VIENTO BAJO
CONDICIONES DE VIENTO VARIABLE Y ESTABLE EN LA
EPIER-SEDE AYABACAS"**

Bach. Claudia Mirella Benavides Quispe

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES**

Asesor: M.Sc. Armando Antonio Salinas Del Carpio



**Juliaca – Perú
2025**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL INGENIERÍA EN ENERGÍAS
RENOVABLES



**“ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE DOCE TIPOS DE
PERFILES AERODINÁMICOS NACA EN TÚNEL DE VIENTO BAJO
CONDICIONES DE VIENTO VARIABLE Y ESTABLE EN LA
EPIER-SEDE AYABACAS”**

Bach. Claudia Mirella Benavides Quispe

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES**

Asesor: M.Sc. Armando Antonio Salinas Del Carpio

Juliaca – Perú

2025

Benavides, C. (2025). *Análisis y evaluación de la eficiencia de doce tipos de perfiles aerodinámicos NACA en túnel de viento bajo condiciones de viento variable y estable en la EPIER-sede Ayabacas - Juliaca*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Juliaca.

Autor: Claudia Mirella Benavides Quispe

Título: Análisis y evaluación de la eficiencia de doce tipos de perfiles aerodinámicos naca en túnel de viento bajo condiciones de viento variable y estable en la EPIER-sede Ayabacas - Juliaca.

Publicación: Juliaca, 2025

Descripción: Cantidad de páginas (122 páginas)

Nota: Tesis - Escuela profesional de Ingeniería en Energías Renovables - Universidad Nacional de Juliaca

Código: 02-000042-02/B44

Nota: Incluye bibliografía.

Asesor: M.Sc. Armando Antonio Salinas del Carpio

Palabras clave: Eficiencia aerodinámica, eficiencia eléctrica, impresión 3D, perfiles NACA, QBlade, túnel de viento.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES
“ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE DOCE TIPOS DE PERFILES
AERODINÁMICOS NACA EN TÚNEL DE VIENTO BAJO CONDICIONES DE
VIENTO VARIABLE Y ESTABLE EN LA EPIER-SEDE AYABACAS”
TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES

Presentado por:

Bach. Claudia Mirella Benavides Quispe

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. Henry Pizarro Viveros

PRESIDENTE DE JURADO



Mg. Jhon Eduardo Abarca Suca

JURADO (Secretario)



2º MIEMBRO

Mtro. Josmell Tito Calderon

JURADO (Vocal)



3º MIEMBRO



M.Sc. Armando Antonio Salinas del Carpio

ASESOR DE TESIS

Claudia Mirella Benavides Quispe

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE DOCE TIPOS DE PERFILES AERODINÁMICOS NACA EN TÚNEL DE VIENTO ...

 Universidad Nacional de Juliaca

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:499948305

Fecha de entrega

17 sep 2025, 10:57 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

17 sep 2025, 11:04 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

Borrador_Tesis_FINAL_(1).pdf

Tamaño del archivo

4.5 MB

122 páginas

28.109 palabras

137.456 caracteres




8% 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)

Fuentes principales

- 6%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 5%  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.



ARMANDO SALINAS DEL CARPIO
MECÁNICO ELECTRICISTA
Rea. Clp. 112774

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi papá, por ser un ejemplo constante de esfuerzo y entrega; a mi mamá y a mi hermano, por su apoyo incondicional y esa presencia serena, profundamente valiosa que me ha acompañado a lo largo de este proceso; a André, por sostenerme con cariño y por sus palabras oportunas que trajeron aliento en los momentos más difíciles.

A cada uno de ustedes, gracias por ser parte esencial de este logro.

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente al Ing. Armando Antonio Salinas del Carpio, por su valiosa dedicación y compromiso. Su acompañamiento constante fue fundamental para culminar con éxito este trabajo de investigación.

Expreso también mi agradecimiento a la Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables, por brindarme la formación académica y las herramientas necesarias para desarrollar este proyecto. Asimismo, extiendo mi gratitud al personal técnico del laboratorio de energía eólica, por su colaboración en las pruebas experimentales.

De manera especial, agradezco a la Vicepresidencia de Investigación de la Universidad Nacional de Juliaca, por el apoyo económico otorgado mediante el “VI CONCURSO DE PROYECTOS DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL UNAJ 2023”, contrato N° 002-2023-VPIN-CCO-UNAJ, el cual fue esencial para la ejecución experimental de esta tesis.

A todos, gracias por contribuir de manera significativa a este logro académico y personal.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE ANEXOS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xiii
RESUMEN	15
ABSTRACT	16
INTRODUCCIÓN	17

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1	Formulación del problema	18
1.1.1	Problema General	19
1.1.2	Problemas Específicos.....	19
1.2	Objetivos de la investigación	20
1.2.1	Objetivo general	20
1.2.2	Objetivos específicos.....	20
1.3	Justificación de la investigación	20
1.3.1	Justificación Técnica	20
1.3.2	Justificación Económica.....	21
1.3.3	Justificación Social.....	21
1.3.4	Justificación Ambiental.....	21

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1	Antecedentes de la investigación	22
2.1.1	Antecedentes internacionales	22
2.1.2	Antecedentes nacionales	23
2.1.3	Antecedentes locales	24
2.2	Marco teórico	24

2.2.1	Viento	24
2.2.2	Tipos de viento	25
2.2.3	Aerogeneradores.....	25
2.2.4	Partes de un aerogenerador	26
2.2.5	Sistemas de regulación de potencia.....	27
2.2.6	Tipos de aerogeneradores.....	29
2.2.7	Velocidades de operación de los aerogeneradores	31
2.2.8	Materiales utilizados en las palas de aerogeneradores	31
2.2.9	Factores ambientales que afectan el rendimiento del aerogenerador	32
2.2.10	Energía eólica.....	32
2.2.11	Coeficiente de Potencia (C_p).....	33
2.2.12	Eficiencia eléctrica	34
2.2.13	Límite de Betz	33
2.2.14	Número de Reynolds.....	34
2.2.15	Fuerzas aerodinámicas	36
2.2.16	Eficiencia aerodinámica	37
2.2.17	Coeficiente de sustentación C_l	38
2.2.18	Coeficiente de arrastre C_d	38
2.2.19	Perfiles aerodinámicos NACA	39
2.2.20	Túnel de viento.....	41

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	Hipótesis de la investigación.....	42
3.1.1	Hipótesis general	42
3.1.2	Hipótesis específicas	42
3.2	Metodología	42
3.2.1	Tipo, nivel y diseño de investigación.....	42
3.2.2	Ámbito del proyecto.....	43
3.2.3	Población y muestra	43
3.2.4	Operacionalización de variables.....	44
3.3	Simulación aerodinámica de perfiles NACA en Software QBlade	44
3.4	Fabricación de Perfiles Aerodinámicos mediante Impresión 3D.....	60
3.5	Evaluación experimental en túnel de viento	61

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1	Resultados del análisis aerodinámico con QBlade	76
4.1.1	Eficiencia aerodinámica perfil NACA 0006	76
4.1.2	Eficiencia aerodinámica perfil NACA 0008-34.....	77
4.1.3	Eficiencia aerodinámica perfil NACA 0024	78
4.1.4	Eficiencia aerodinámica perfil NACA 4412	79
4.1.5	Eficiencia aerodinámica perfil NACA 4424	80
4.1.6	Eficiencia aerodinámica perfil NACA 6412	81
4.1.7	Eficiencia aerodinámica perfil NACA 6H20	82
4.1.8	Eficiencia aerodinámica perfil NACA 16021	83
4.1.9	Eficiencia aerodinámica perfil NACA 66021	84
4.1.10	Eficiencia aerodinámica perfil NACA 63(2)A-015	85
4.1.11	Eficiencia aerodinámica perfil NACA 11H09	86
4.1.12	Eficiencia aerodinámica perfil NACA 64(1)212 MOD A	87
4.1.13	Comparativa L/D (Eficiencia aerodinámica)	88
4.2	Resultados de la fabricación de perfiles en impresión 3D	90
4.3	Resultados experimentales en túnel de viento	95
4.3.1	Eficiencia eléctrica perfil NACA 0006	95
4.3.2	Eficiencia eléctrica perfil NACA 0008-34.....	96
4.3.3	Eficiencia eléctrica perfil NACA 0024	97
4.3.4	Eficiencia eléctrica perfil NACA 4412	98
4.3.5	Eficiencia eléctrica perfil NACA 4424	99
4.3.6	Eficiencia eléctrica perfil NACA 6412	100
4.3.7	Eficiencia eléctrica perfil NACA 6H20	101
4.3.8	Eficiencia eléctrica perfil NACA 16021	102
4.3.9	Eficiencia eléctrica perfil NACA 66021	103
4.3.10	Eficiencia eléctrica perfil NACA 63(2)A-015	104
4.3.11	Eficiencia eléctrica perfil NACA 11H09	105
4.3.12	Eficiencia eléctrica perfil NACA 64(1)212 MOD A	106
4.3.13	Comparación de eficiencia eléctrica	107
4.4	Análisis y evaluación de la eficiencia de doce perfiles NACA	109
4.5	Discusiones	111

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	Conclusiones	112
5.2	Recomendaciones.....	113
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		114
ANEXOS		119
Anexo 1. Perfiles aerodinámicos NACA de la familia 0006–6121.....		1199

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Velocidades de referencia para estudios experimentales	31
Tabla 2. Operacionalización de las variables.	44
Tabla 3. Perfiles aerodinámicos NACA seleccionados para la experimentación.....	45
Tabla 4. Número de Reynolds para el perfil NACA 0006	47
Tabla 5. Número de Reynolds para el perfil NACA 0008-34.....	48
Tabla 6. Número de Reynolds para el perfil NACA 0024	49
Tabla 7. Número de Reynolds para el perfil NACA 4412	50
Tabla 8. Número de Reynolds para el perfil NACA 4424	51
Tabla 9. Número de Reynolds para el perfil NACA 6412	52
Tabla 10. Número de Reynolds para el perfil NACA 6H20	53
Tabla 11. Número de Reynolds para el perfil NACA 16021	54
Tabla 12. Número de Reynolds para el perfil NACA 66021	55
Tabla 13. Número de Reynolds para el perfil NACA 63(2)A-015	56
Tabla 14. Número de Reynolds para el perfil NACA 11H09	57
Tabla 15. Número de Reynolds para el perfil NACA 64(1)212MOD-A.....	58
Tabla 16. Velocidades registradas en 225 puntos de medición de caudal a 3 m/s	63
Tabla 17. Velocidades registradas en 225 puntos de medición de caudal a 4 m/s	65
Tabla 18. Velocidades registradas en 225 puntos de medición de caudal a 5 m/s	65
Tabla 19. Velocidades registradas en 225 puntos de medición de caudal a 6 m/s	66
Tabla 20. Velocidades registradas en 225 puntos de medición de caudal a 7 m/s	67
Tabla 21. Velocidades registradas en 225 puntos de medición de caudal a 8 m/s	68
Tabla 22. Velocidades registradas en 225 puntos de medición de caudal a 9 m/s	69
Tabla 23. Velocidades registradas en 225 puntos de medición de caudal a 10 m/s.	69
Tabla 24. Velocidades registradas en 225 puntos de medición de caudal a 11 m/s	70
Tabla 25. Velocidades registradas en 225 puntos de medición de caudal a 12 m/s	70
Tabla 26. Características del aerogenerador.....	72
Tabla 27. Cálculo de L/D NACA 0006	76
Tabla 28. Cálculo de L/D NACA 0008-34	77
Tabla 29. Cálculo de L/D NACA 0024.....	78
Tabla 30. Cálculo de L/D NACA 4412.....	79

Tabla 31. Cálculo de L/D NACA 4424.....	80
Tabla 32. Cálculo de L/D NACA 6412.....	81
Tabla 33. Cálculo de L/D NACA 6H20.....	82
Tabla 34. Cálculo de L/D NACA 16021.....	83
Tabla 35. Cálculo de L/D NACA 66021.....	84
Tabla 36. Cálculo de L/D NACA 63(2)A-015.....	85
Tabla 37. Cálculo de L/D NACA 11H09.....	86
Tabla 38. Cálculo de L/D NACA 64(1)212 MOD A.....	87
Tabla 39. Resumen de la relación L/D máxima y mínima para perfiles NACA, con velocidad de viento correspondiente.....	88
Tabla 40. Perfiles aerodinámicos NACA fabricados mediante impresión 3D.....	90
Tabla 41. Desempeño eléctrico del perfil NACA 0006.....	95
Tabla 42. Desempeño eléctrico del perfil NACA 0008-34.....	96
Tabla 43. Desempeño eléctrico del perfil NACA 0024.....	97
Tabla 44. Desempeño eléctrico del perfil NACA 4412.....	98
Tabla 45. Desempeño eléctrico del perfil NACA 4424.....	99
Tabla 46. Desempeño eléctrico del perfil NACA 6412.....	100
Tabla 47. Desempeño eléctrico del perfil NACA 6H20.....	101
Tabla 48. Desempeño eléctrico del perfil NACA 16021.....	102
Tabla 49. Desempeño eléctrico del perfil NACA 66021.....	103
Tabla 50. Desempeño eléctrico del perfil NACA 63(2)A-015.....	104
Tabla 51. Desempeño eléctrico del perfil NACA 11H09.....	105
Tabla 52. Desempeño eléctrico del perfil NACA 64(1)212 MOD A.....	106
Tabla 53. Resumen comparativo de la eficiencia eléctrica de perfiles aerodinámicos NACA	107
Tabla 54. Comparación de eficiencia eléctrica y desempeño aerodinámico de perfiles NACA.....	109

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Primera turbina eólica construida por Charles Brush.	18
Figura 2. Parque eólico terrestre.	26
Figura 3. Partes de un aerogenerador.	27
Figura 4. Pitch Control.	28
Figura 5. Condiciones de flujo en pérdida.	28
Figura 6. Aerogenerador de eje horizontal - (HAWT - Horizontal Axis Wind Turbines).	29
Figura 7. Aerogenerador de eje vertical (VAWT - Vertical Axis Wind Turbines).	30
Figura 8. Flujo laminar.	35
Figura 9. Flujo turbulento.	35
Figura 10. Zona de transición.	36
Figura 11. Fuerzas sobre un perfil aerodinámico.	37
Figura 12. Perfiles aerodinámicos NACA.	39
Figura 13. Terminología del perfil aerodinámico.	40
Figura 14. Partes características de un túnel de viento.	41
Figura 15. Simulación en QBlade NACA 0006.	47
Figura 16. Simulación en QBlade NACA 0008-34.	48
Figura 17. Simulación en QBlade NACA 0024.	49
Figura 18. Simulación en QBlade NACA 4412.	50
Figura 19. Simulación en QBlade NACA 4424.	51
Figura 20. Simulación en QBlade NACA 6412.	52
Figura 21. Simulación en QBlade NACA 6H20.	53
Figura 22. Simulación en QBlade NACA 16021.	54
Figura 23. Simulación en QBlade NACA 66021.	55
Figura 24. Simulación en QBlade NACA 63(2)A-015.	56
Figura 25. Simulación en QBlade NACA 11H09.	57
Figura 26. Simulación en QBlade NACA 64(1)212 MOD A.	58
Figura 27. Simulación en QBlade (Cl vs. Cd) de perfiles NACA.	59
Figura 28. Perfil NACA 0024 modelado en QBlade en formato STL.	60
Figura 29. Perfiles aerodinámicos impresos en material PLA.	60
Figura 30. Túnel de viento WIND-TU2/EV.	61
Figura 31. Puntos de medición para la estimación del caudal.	62

Figura 32. Anemómetro portátil UNI-T.	63
Figura 33. Curva de presión-caudal.....	64
Figura 34. Curva de presión-caudal a 6 m/s.	66
Figura 35. Curva de presión-caudal a 7 m/s.	67
Figura 36. Curva de presión-caudal a 8 m/s.	68
Figura 37. Aerogenerador de eje horizontal tripala.....	72
Figura 38. Pinza amperimétrica UNI T UT211B.	73
Figura 39. Multímetro digital UNI T UT33A+.	73
Figura 40. Inversor serie DY-8102.....	74
Figura 41. Controlador Victron MPPT 75 15.....	75
Figura 42. Equipo de pruebas para evaluación de perfiles aerodinámicos NACA.	75
Figura 43. Relación sustentación - arrastre NACA 0006.	76
Figura 44. Relación sustentación - arrastre NACA 0008-34.....	77
Figura 45. Relación sustentación - arrastre NACA 0024.	78
Figura 46. Relación sustentación - arrastre NACA 4412.	79
Figura 47. Relación sustentación - arrastre NACA 4424.	80
Figura 48. Relación sustentación - arrastre NACA 6412.	81
Figura 49. Relación sustentación - arrastre NACA 6H20.	82
Figura 50. Relación sustentación - arrastre NACA 16021.	83
Figura 51. Relación sustentación - arrastre NACA 66021.	84
Figura 52. Relación sustentación - arrastre NACA 63(2)A-015.	85
Figura 53. Relación sustentación - arrastre NACA 11H09.	86
Figura 54. Relación sustentación - arrastre NACA 64(1)212 MOD A.	87
Figura 55. Comparación de la relación L/D vs Velocidad del viento.	89
Figura 56. Eficiencia eléctrica del perfil NACA 0006.	95
Figura 57. Eficiencia eléctrica del perfil NACA 0008-34.....	96
Figura 58. Eficiencia eléctrica del perfil NACA 0024.	97
Figura 59. Eficiencia eléctrica del perfil NACA 4412.	98
Figura 60. Eficiencia eléctrica del perfil NACA 4424.	99
Figura 61. Eficiencia eléctrica del perfil NACA 6412.	100
Figura 62. Eficiencia eléctrica del perfil NACA 6H20.	101
Figura 63. Eficiencia eléctrica del perfil NACA 16021.	102
Figura 64. Eficiencia eléctrica del perfil NACA 66021.	103

Figura 65. Eficiencia eléctrica del perfil NACA 63(2)A-015.	104
Figura 66. Eficiencia eléctrica del perfil NACA 11H09.	105
Figura 67. Eficiencia eléctrica del perfil NACA 64(1)212 MOD.	106
Figura 68. Comparación de la eficiencia eléctrica de doce perfiles NACA.	108
Figura 69. Relación entre eficiencia eléctrica y eficiencia aerodinámica en perfiles NACA..	109

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. <i>Perfiles aerodinámicos NACA de la familia 0006–6121</i>	119

LISTA DE ABREVIATURAS

2D	: Dos dimensiones
3D	: Tres dimensiones
AC	: Alternating Current (Corriente alterna)
CAD	: Computer-Aided Design (Diseño asistido por computadora)
Cd	: Drag Coefficient (Coeficiente de arrastre)
CFD	: Computational Fluid Dynamics (Dinámica de Fluidos Computacional)
Cl	: Lift Coefficient (Coeficiente de sustentación)
DC	: Direct Current (Corriente continua)
EPIER	: Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables
HAWT	: Horizontal Axis Wind Turbine (Aerogenerador de eje horizontal)
Kw	: Kilowatt
L/D	: Lift-to-Drag Ratio (Relación sustentación-arrastre)
MPPT	: Maximum Power Point Tracking (Seguimiento del punto de máxima potencia)
NACA	: National Advisory Committee for Aeronautics (Comité Consultivo Nacional para la Aeronáutica)
NREL	: National Renewable Energy Laboratory (Laboratorio Nacional de Energías Renovables)
PLA	: Polylactic Acid (Ácido poliláctico, usado en impresión 3D)
PV	: Photovoltaic (Fotovoltaico)
QBlade	: Software para simulación de turbinas eólicas y análisis aerodinámico
RPM	: Revoluciones por minuto
RPS	: Revoluciones por segundo
STL	: STereoLithography (Estereolitografía)
TSR	: Tip Speed Ratio (Relación de velocidad en la punta del aspa)

UNI-T : Marca comercial de instrumentos de medición eléctricos

VAWT : Vertical Axis Wind Turbine (Aerogenerador de eje vertical)

VDI : Verein Deutscher Ingenieure (Asociación de Ingenieros Alemanes)

RESUMEN

La eficiencia aerodinámica y eléctrica de los perfiles aerodinámicos representa un factor clave en el diseño de aerogeneradores de baja potencia, especialmente en regiones con viento variable como Juliaca. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo general analizar y evaluar la eficiencia de doce perfiles aerodinámicos NACA aplicables a aerogeneradores de eje horizontal, bajo condiciones de viento variable y estable. Para alcanzar dicho propósito, se aplicó una metodología combinada que incluyó simulaciones computacionales en el software QBlade para el análisis aerodinámico, la fabricación de modelos a escala mediante impresión 3D con filamento PLA, y pruebas experimentales en túnel de viento, registrando la tensión y corriente generadas para estimar la eficiencia eléctrica de cada perfil. Los análisis aerodinámicos se enfocaron en la obtención de los coeficientes de sustentación (C_l), arrastre (C_d) y la relación sustentación/arrastre (L/D). Los resultados más relevantes mostraron que el perfil NACA 0008-34 alcanzó la mayor eficiencia aerodinámica con una relación L/D de 5.476 a 8 m/s; sin embargo, no presentó un buen desempeño eléctrico. En cambio, los perfiles NACA 63(2)A-015 y NACA 64(1)-212 MOD A obtuvieron las mayores eficiencias eléctricas, ambas del 21.7 %, a velocidades de viento entre 8 y 9 m/s. En conclusión, se demostró que los perfiles asimétricos y modificados presentan un mejor equilibrio entre sustentación y arrastre, resultando más adecuados para maximizar la generación eléctrica. Los resultados obtenidos validan la efectividad de la metodología empleada y aportan al diseño de turbinas eólicas eficientes, adaptadas a contextos de viento variable y baja densidad energética como el altiplano peruano.

Palabras clave: Eficiencia aerodinámica, eficiencia eléctrica, impresión 3D, perfiles NACA, QBlade, túnel de viento.

ABSTRACT

The aerodynamic and electrical efficiency of airfoil profiles is a key factor in the design of small-scale wind turbines, particularly in regions with variable wind conditions such as Juliaca. In this context, the main objective of this research was to analyze and evaluate the efficiency of twelve NACA airfoil profiles applicable to horizontal-axis wind turbines, under both variable and stable wind conditions. To achieve this objective, a combined methodology was applied, which included computational simulations using QBlade software for aerodynamic analysis, the fabrication of scaled models through 3D printing with PLA filament, and experimental tests in a wind tunnel by measuring the generated voltage and current to estimate the electrical efficiency of each profile. The aerodynamic analysis focused on determining the lift coefficient (C_l), drag coefficient (C_d), and the lift-to-drag ratio (L/D). The most relevant results showed that the NACA 0008-34 profile achieved the highest aerodynamic efficiency, with an L/D ratio of 5.476 at 8 m/s; however, it did not perform well in terms of electrical output. In contrast, the NACA 63(2)A-015 and NACA 64(1)-212 MOD A profiles achieved the highest electrical efficiencies, both reaching 21.7% at wind speeds between 8 and 9 m/s. In conclusion, the results demonstrated that asymmetric and modified profiles offer a better balance between lift and drag, making them more suitable for maximizing electrical generation. The findings validate the effectiveness of the proposed methodology and contribute to the design of efficient wind turbines adapted to changing wind conditions and low energy density environments such as the Peruvian highlands.

Keywords: 3D printing, Aerodynamic efficiency, electrical efficiency, NACA airfoils, QBlade, wind tunnel.

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento eficiente de la energía eólica se ha convertido en una prioridad estratégica dentro del desarrollo sostenible y la transición energética global (IEA, 2023). En este escenario, los aerogeneradores de eje horizontal se consolidan como una tecnología madura para la conversión de la energía cinética del viento en energía eléctrica (Manwell et al., 2010). No obstante, su rendimiento depende en gran medida de la geometría aerodinámica de las palas, las cuales influyen directamente en la generación de sustentación, la reducción del arrastre y, en consecuencia, la eficiencia global del sistema (Hansen, 2015).

Bajo esta premisa, la presente investigación realiza un análisis comparativo de doce perfiles NACA, orientado a determinar su comportamiento aerodinámico y eléctrico en contextos de viento variable y estable. El estudio combina simulaciones computacionales con el software QBlade con una fase experimental llevada a cabo en túnel de viento. Para garantizar la precisión geométrica de las pruebas, los modelos de las aspas fueron fabricados mediante impresión 3D, lo que permitió reproducir fielmente las condiciones de diseño en un entorno controlado.

Durante los ensayos, los perfiles fueron expuestos a velocidades de viento entre 3 m/s y 12 m/s, registrándose datos de tensión y corriente para calcular la potencia eléctrica generada. Asimismo, se determinaron los coeficientes de sustentación y arrastre, con el fin de estimar la relación L/D (sustentación/arrastre), parámetro clave para evaluar la eficiencia aerodinámica (Abbott & Von Doenhoff, 1959). Esta aproximación metodológica permitió comparar objetivamente el desempeño de cada perfil, destacando aquellos que ofrecen un balance favorable entre generación eléctrica y rendimiento aerodinámico.

Los resultados obtenidos confirman que la metodología empleada fue adecuada y permitieron identificar perfiles —especialmente los asimétricos y modificados— que ofrecen un mejor desempeño. Esto es importante para mejorar el diseño de aerogeneradores pequeños que funcionen de manera eficiente en lugares con viento cambiante, como las zonas andinas. Además, el estudio aporta ideas útiles para seguir desarrollando tecnologías eólicas que se adapten a las necesidades de comunidades rurales.

CAPÍTULO I

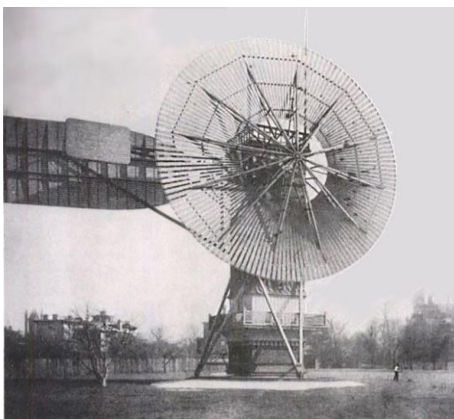
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Formulación del problema

En el contexto actual de búsqueda de fuentes de energía sostenibles y renovables, los aerogeneradores de eje horizontal desempeñan un papel fundamental en la generación de electricidad a partir del viento a gran escala. La primera turbina eólica funcionaba de forma automática para generar electricidad fue construida en 1887 por el científico Charles Brush (Association, 2003). La NACA (Comité Asesor Nacional para la Aeronáutica) desempeñó un papel esencial en el desarrollo de la aviación moderna y la investigación aeroespacial en Estados Unidos durante el siglo XX. Durante su existencia (1915-1958), la NACA llevó a cabo investigaciones en aerodinámica, incluyendo el diseño y análisis de perfiles aerodinámicos, conocidos como perfiles NACA. Desde entonces, la energía eólica ha evolucionado y se ha convertido en una de las tres fuentes de energía renovable más demandadas a nivel mundial. Su crecimiento continuo se debe a su capacidad para proporcionar una fuente limpia y abundante de energía, contribuyendo así a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y al impulso de la transición hacia un futuro más sostenible.

Figura 1

Primera turbina eólica construida por Charles Brush



Nota. Adaptado de Gamesa (2023).

La Figura 1, muestra el primer aerogenerador de gran escala, diseñado en 1887. Su estructura marcó un hito en la conversión de energía eólica en electricidad.

Actualmente, la matriz energética del Perú está conformada por: termoeléctrica 56.1%, hidroeléctrica 38.7%, eólica 3.1% y solar 2.1% (Ministerio de Energía y Minas, 2023). En cuanto al potencial eólico, destacan las costas del departamento de Piura, Lambayeque y algunas zonas de La Libertad. Asimismo, los departamentos de Áncash, Lima y Arequipa presentan condiciones favorables; sin embargo, el departamento con mayores posibilidades eólicas es Ica (Ministerio de Energía y Minas, 2008). A pesar de la existencia de numerosos perfiles aerodinámicos disponibles para aerogeneradores de eje horizontal, aún no se ha establecido con certeza cuáles son los más adecuados para maximizar la eficiencia en la conversión de energía eólica en energía eléctrica bajo diferentes escenarios. Cabe señalar que la intensidad del viento puede variar tanto a lo largo del día como entre distintas ubicaciones geográficas. Por ejemplo, algunos lugares experimentan vientos más fuertes durante el día, mientras que en otros la intensidad aumenta durante la noche (Heinberg & Fridley, 2016). Además, en zonas de mayor altitud, como colinas y montañas, la velocidad del viento suele ser considerablemente mayor.

La eficiencia de un aerogenerador de eje horizontal está estrechamente relacionada con el perfil aerodinámico de sus palas, ya que este define su geometría y la forma en que interactúan con el flujo de aire. Esta interacción influye directamente en la capacidad del rotor para transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica. Dado que existen numerosos perfiles NACA con distintas proporciones de espesor y curvatura, es necesario seleccionar una muestra representativa que permita comparar su comportamiento bajo condiciones de viento variable y estable. Esta evaluación se realizó en el túnel de viento del Laboratorio de Energía Eólica de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables, sede Ayabacas de la Universidad Nacional de Juliaca.

1.1.1 Problema General

- ¿Cuál de los doce tipos de perfiles aerodinámicos NACA para aerogeneradores de eje horizontal demuestra la mayor eficiencia bajo condiciones de viento variable y estable?

1.1.2 Problemas Específicos

- ¿Se pueden analizar y evaluar los diferentes parámetros de diseño basados en las especificaciones de los reportes NACA utilizando un software de simulación?

- ¿De qué manera se pueden construir doce juegos perfiles aerodinámicos a escala para un aerogenerador tripala cumpliendo con las especificaciones NACA con el propósito de realizar pruebas en el túnel de viento?
- ¿Se pueden simular condiciones de viento variable y estable en el túnel de viento de la EPIER para probar con diferentes perfiles aerodinámicos?

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo general

- Analizar y evaluar la eficiencia de doce tipos de perfiles aerodinámicos NACA para aerogeneradores de eje horizontal bajo condiciones de viento variable y estable.

1.2.2 Objetivos específicos

- Utilizar el software Qblade para analizar y evaluar los coeficientes de sustentación y arrastre de diseño de los perfiles NACA.
- Construir doce juegos de perfiles aerodinámicos a escala utilizando impresión 3D cumpliendo los parámetros NACA.
- Utilizar el túnel de viento de la EPIER para simular condiciones de viento variable y estable y probar los diferentes perfiles aerodinámicos.

1.3 Justificación de la investigación

1.3.1 Justificación Técnica

La eficiencia de un aerogenerador depende directamente del perfil aerodinámico de sus palas, dado que cada geometría interactúa de manera distinta con el flujo de viento. Una comprensión limitada de estas interacciones dificulta la optimización del diseño, reduciendo así la capacidad del aerogenerador para generar la máxima cantidad de energía posible (Ganiele et al., 2021). Por ello, el uso del túnel de viento resulta fundamental, ya que permite simular y controlar las condiciones de viento en un entorno experimental, facilitando el análisis y evaluación del comportamiento aerodinámico de los diferentes perfiles.

1.3.2 Justificación Económica

La impresión 3D ofrece la posibilidad de fabricar perfiles aerodinámicos de manera económica, rápida y con gran precisión. Esta tecnología permite reducir los costos asociados al prototipado y facilita la personalización de diseños para pruebas experimentales. Sin embargo, es fundamental evaluar cómo estos perfiles se comportan en condiciones reales de viento para mejorar la eficiencia a costos más accesibles para los usuarios finales (Ngo et al., 2018).

1.3.3 Justificación Social

La tecnología de los aerogeneradores continúa evolucionando con el objetivo de mejorar la eficiencia, reducir los costos de generación eléctrica y, en consecuencia, disminuir las tarifas que deben pagar los usuarios finales. Esto representa un beneficio directo para las familias, especialmente en zonas rurales o aisladas, donde el acceso a fuentes energéticas tradicionales es limitado y costoso (IRENA, 2020).

1.3.4 Justificación Ambiental

El desarrollo y optimización de aerogeneradores contribuyen directamente a la generación de energía limpia y sostenible, lo que permite reducir la dependencia de fuentes fósiles y, por ende, las emisiones de gases de efecto invernadero. Mejorar la eficiencia de los perfiles aerodinámicos de las palas incrementa el aprovechamiento del recurso eólico, favoreciendo una mayor producción energética con menor impacto ambiental. En este contexto, la presente investigación promueve el uso de tecnologías renovables como herramienta clave para mitigar el cambio climático y fomentar un desarrollo energético más responsable y respetuoso con el medio ambiente (Solís et al., 2019).

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

Un antecedente relevante a nivel internacional es el estudio realizado por Ganiele et al. (2021) en Argentina, enfocado en el diseño y simulación de perfiles aerodinámicos para aerogeneradores de eje horizontal que operan a bajo número de Reynolds. En dicha investigación se evaluaron ocho perfiles: NACA 0012, NACA 4412, NREL S822, NREL S823, NREL S833, Clark Y, SD7080 (9.2 %) y Wortmann FX 63-137, utilizando los softwares QBlade y Flow Simulation para modelar el comportamiento del flujo de aire alrededor de cada perfil bajo diferentes condiciones operativas. Los resultados obtenidos en ambos entornos fueron comparados, destacando el perfil Clark Y como el más eficiente para su implementación en un aerogenerador de baja potencia de 1 kW.

Un estudio comparativo de perfiles aerodinámicos fue desarrollado por Ramírez (2019), quién realizó un estudio en México entre cuatro perfiles aerodinámicos —NACA 0012, NACA 2412, NACA 4412 y NACA 6409— con el propósito de identificar el más adecuado para el diseño de álabes en un aerogenerador de eje horizontal. Utilizando el software XFLR5, analizó el comportamiento de los perfiles en términos de coeficiente de sustentación (C_L), coeficiente de arrastre (C_D), y la relación (C_L/C_D), bajo un número de Reynolds constante. Los resultados indicaron que el perfil NACA 4412 ofrecía el mejor compromiso entre eficiencia aerodinámica y estabilidad frente a la pérdida, destacándolo como el más apropiado para aerogeneradores de baja potencia en condiciones de viento moderado. Este antecedente refuerza la necesidad de realizar análisis comparativos adaptados a contextos específicos de operación.

Otro estudio relevante es el de Celik (2022), quien comparó el comportamiento de perfiles aerodinámicos de las familias NACA y NREL aplicados a aerogeneradores de eje vertical tipo Darrieus, utilizando simulaciones CFD en Turquía. Se analizaron los perfiles NACA 0015, NACA 0021, S814 y S825, evaluando su eficiencia mediante el coeficiente de torque en diferentes valores de tip speed ratio (TSR). Los resultados indicaron que los perfiles NACA funcionaban mejor a altas velocidades de rotación, mientras que los perfiles NREL ofrecían

mejor desempeño en las etapas de arranque, cuando el TSR es bajo. Este estudio destaca cómo la forma del perfil influye en el rendimiento del aerogenerador, y resalta la importancia de elegir el perfil adecuado según las condiciones del viento y del tipo de turbina.

Un estudio en Barcelona realizado por López (2021), consistió en realizar un análisis exhaustivo de un perfil aerodinámico NACA 4412, en diversas condiciones para lograrlo llevó a cabo una simulación numérica mediante el software Ansys Fluent y también utilizó un túnel de viento; los resultados que obtuvo demostraron que el perfil tiene un comportamiento óptimo a elevados números de Reynolds, lo que implica un aumento en el coeficiente de sustentación y una disminución en el coeficiente de arrastre.

2.1.2 Antecedentes nacionales

En Arequipa, Chuquimamani (2017) evaluó cómo la modificación del perfil alar influye en la potencia generada por una turbina eólica de baja escala. Mediante un ventilador axial para simular viento en laboratorio, comparó perfiles NACA 4412 y 4415; los resultados mostraron un aumento de alrededor del 10 % en la potencia eléctrica, lo que evidencia que pequeños cambios en la geometría del perfil pueden tener un impacto significativo en el rendimiento de aerogeneradores locales.

En la Universidad Nacional del Santa (Chimbote), Bardales & Egusquiza (2019) investigaron la influencia del paso variable de los álabes en la potencia generada por un aerogenerador tripala. Utilizaron coordenadas de perfiles NACA 4412, NACA 4415 y NACA 4418 extraídas de *Airfoil Tools* y diseñadas en *SolidWorks 2018*, para luego ser analizadas mediante el complemento Flow Simulation. Manteniendo constante la velocidad del viento, evaluaron el comportamiento de los perfiles frente a distintos ángulos de paso (0 a 75°) y velocidades de viento (4–24 m/s). Los resultados revelaron que la potencia variaba según el ángulo del paso, con el perfil NACA 4415 mostrando el mayor aumento de potencia, seguido del NACA 4418 y el NACA 4412.

En la Universidad Nacional del Santa, Rodríguez (2022) realizó un análisis aerodinámico de seis perfiles aplicables a aerogeneradores de baja potencia (entre 1 y 10 kW), considerando las condiciones de viento del campus universitario. El estudio evaluó los perfiles NACA 2412, NACA 4412, E387, S1223, SD7032 y FX63-137, evaluados mediante simulaciones CFD. Los resultados indicaron que el perfil SD7032 obtuvo la mejor relación entre coeficiente de

sustentación y arrastre (C_L/C_D), con un valor de 63.80, seguido por el perfil NACA 4412, que alcanzó 54.27. Esta investigación resalta la importancia de seleccionar perfiles con alto rendimiento aerodinámico para optimizar la eficiencia en regiones con vientos moderados.

En la Pontificia Universidad Católica del Perú, Povis (2016) desarrolló un estudio comparativo de perfiles aerodinámicos aplicados al diseño de una turbina eólica de 3 kW. La investigación empleó un enfoque mixto que combinó métodos analíticos con simulaciones numéricas CFD, con el fin de evaluar el rendimiento de cuatro perfiles. El análisis se centró en las curvas del coeficiente de potencia en función de la velocidad específica de punta, y determinó que el perfil Wortmann FX 60-126 presentó el mejor desempeño aerodinámico. Además, el estudio permitió validar que el método analítico utilizado es una herramienta confiable para predecir el comportamiento de perfiles en turbinas de baja potencia.

2.1.3 Antecedentes locales

En el ámbito local se identifica una falta de trabajos previos de investigación relacionados específicamente el problema o fenómeno objeto de investigación en la región, siendo que esta ausencia de antecedentes destaca la necesidad de realizar este proyecto de investigación para determinar cuál perfil aerodinámico es el más eficiente a condiciones de viento variable en el ámbito local.

2.2 Marco teórico

2.2.1 Viento

El viento es un fenómeno atmosférico que se forma debido a disparidades en la presión y temperatura atmosférica, generadas por la distribución irregular del calor proveniente del sol sobre la superficie terrestre. El viento se desplaza de áreas de baja presión para equilibrar las diferencias de presión atmosférica. Se mide con instrumentos como el anemómetro y la veleta, y su velocidad se expresa en unidades como m/s o km/h. Además de su influencia en el clima local, es utilizado para generar energía limpia y renovable a través de la energía cinética del viento (Solís et al., 2019).

2.2.2 Tipos de viento

El viento es un fenómeno atmosférico complejo influenciado por múltiples factores geográficos y meteorológicos. Su clasificación es esencial para comprender su impacto en el rendimiento de los aerogeneradores (Manwell et al., 2010).

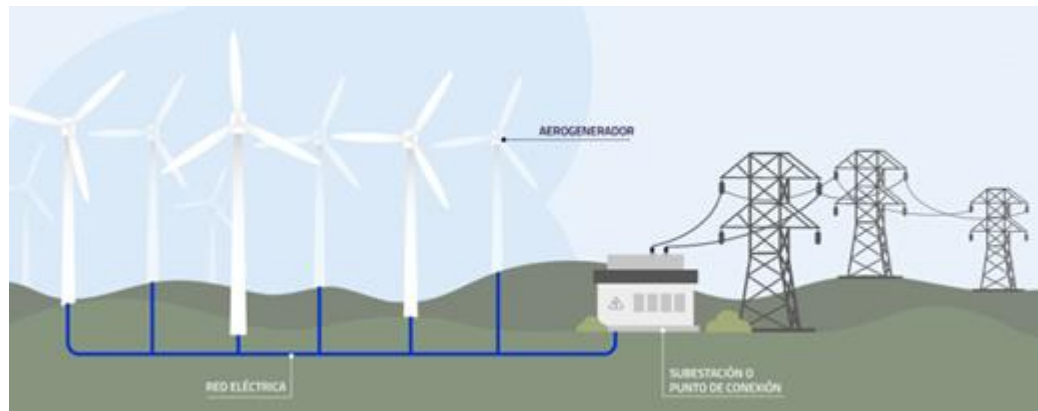
- a) **Viento global:** Son corrientes de aire generadas por la rotación de la Tierra y las diferencias térmicas entre el ecuador y los polos. Ejemplos incluyen los vientos alisios y los vientos del oeste (Morales, 2023; Stull, 2017).
- b) **Viento local:** Generado por diferencias locales de temperatura y presión, como las brisas marinas y terrestres, y los vientos de montaña y valle (Manwell et al., 2010; Stull, 2017).
- c) **Viento turbulento:** Se caracteriza por variaciones irregulares en velocidad y dirección. Es común en áreas cercanas a obstáculos como montañas, edificios o bosques, y puede afectar negativamente la estabilidad del aerogenerador (Burton et al., 2011).
- d) **Ráfagas y turbulencias atmosféricas:** Son cambios súbitos en la velocidad del viento debido a fenómenos meteorológicos como tormentas, frentes fríos o actividad convectiva (Hau, 2013).
- e) **Viento de cizalladura:** Se produce cuando hay una variación abrupta en la dirección o velocidad del viento en una distancia corta, afectando la estabilidad de los aerogeneradores y el desempeño de sus sistemas de control (Burton et al., 2011; Hansen, 2015).

2.2.3 Aerogeneradores

Un aerogenerador es un dispositivo diseñado para convertir la energía cinética del viento en energía mecánica y, posteriormente, en energía eléctrica. Su funcionamiento se basa en el principio de aerodinámica y en la conversión de energía por medio de un generador eléctrico (Manwell et al., 2010).

Figura 2

Parque eólico terrestre



Nota. Adaptado de Ormanzabal (2025).

La Figura 2, representa el funcionamiento de un parque eólico terrestre. Se destaca la transformación y transporte de energía generada hacia la red eléctrica, lo que ilustra su integración en sistemas nacionales.

2.2.4 Partes de un aerogenerador

- Rotor: Compuesto por las palas y el buje. Captura la energía del viento y la convierte en energía mecánica de rotación.
- Nave (góndola): Contiene el generador, el sistema de control y la caja multiplicadora (en caso de ser necesaria).
- Torre (mástil): Estructura que sostiene el rotor y la góndola a una altura óptima para captar el viento.
- Sistema de control: Regula la orientación del aerogenerador y la velocidad de rotación de las palas para optimizar la eficiencia.
- Generador eléctrico: Convierte la energía mecánica en electricidad. Puede ser síncrono o asíncrono.
- Sistema de orientación (yaw): Ajusta la dirección de la góndola para que el rotor esté alineado con la dirección del viento.
- Sistema de frenado: Permite detener el rotor en caso de viento extremo o mantenimiento.

Figura 3

Partes de un aerogenerador



Nota. Adaptado de Organización de Consumidores y Usuarios (OCU, 2022).

En la Figura 3, se muestra el sistema de control de paso, que ajusta el ángulo de las palas para regular la potencia generada ante variaciones del viento.

2.2.5 Sistemas de regulación de potencia

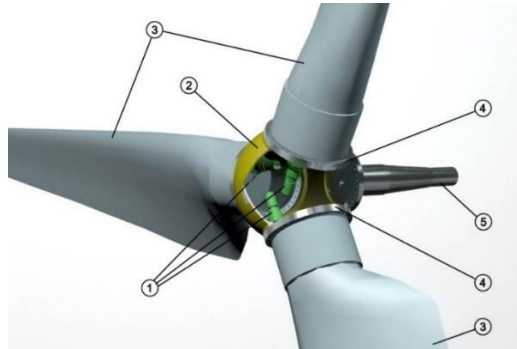
Los aerogeneradores modernos emplean distintos mecanismos para regular la potencia y evitar sobrecargas cuando la velocidad del viento supera ciertos límites, asegurando un funcionamiento eficiente y seguro. El control de potencia es fundamental para prevenir daños en el generador eléctrico, ya que limita la energía capturada cuando el viento es demasiado fuerte, evitando sobrecargas y mejorando la estabilidad del sistema. Existen dos principales estrategias de control: pitch control y stall control (Burton et al., 2011).

a) Pitch Control

El pitch control consiste en variar activamente el ángulo de ataque de las palas del rotor. Cuando la velocidad del viento es demasiado alta, las palas se giran en torno a su eje longitudinal para reducir la cantidad de energía capturada. Esta estrategia permite un control más preciso de la potencia generada y es común en aerogeneradores modernos de mediana y gran escala (Burton et al., 2011).

Figura 4

Pitch Control



Nota. Adaptado de Peng (2020).

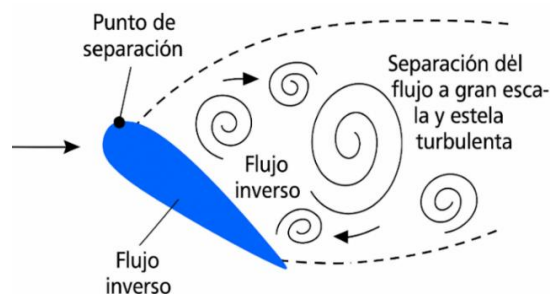
En la Figura 4, se muestra el sistema de control de paso, que ajusta el ángulo de las palas para regular la potencia generada ante variaciones del viento. Donde: 1-motor de Pitch, 2-buje seccionado, 3-pala, 4-cojinete de Pitch, 5-eje principal.

b) Stall Control

El stall control, en cambio, es una estrategia pasiva en la que las palas están diseñadas para que, al alcanzar cierta velocidad del viento, el flujo de aire se separe de su superficie, reduciendo automáticamente la sustentación. Esto limita la potencia sin necesidad de componentes móviles, lo que lo hace más simple y robusto, aunque menos eficiente que el pitch control en términos de regulación (Manwell et al., 2010).

Figura 5

Condiciones de flujo en pérdida



Nota. Adaptado de Leishman (2022).

La Figura 5, ilustra el fenómeno de pérdida de sustentación, mecanismo pasivo utilizado en el control de potencia de algunos aerogeneradores.

2.2.6 Tipos de aerogeneradores

a. Según la orientación del eje de rotación

Aerogeneradores de eje horizontal (HAWT - Horizontal Axis Wind Turbines)

Los aerogeneradores de eje horizontal son los más utilizados en la industria eólica debido a su alta eficiencia y confiabilidad. Su diseño se caracteriza por tener el eje de rotación paralelo al suelo y, comúnmente, tres palas aerodinámicas que permiten una mejor captura de la energía del viento. Estos aerogeneradores pueden clasificarse en dos configuraciones: a barlovento, donde las palas están orientadas hacia el viento, y a sotavento, con las palas ubicadas detrás de la torre. Para operar correctamente, requieren un sistema de orientación que mantenga el rotor alineado con la dirección predominante del viento, optimizando así su desempeño energético (Hau, 2013).

Figura 6

Aerogenerador de eje horizontal - (HAWT - Horizontal Axis Wind Turbines)



Nota. Adaptado de OCU (2022).

La Figura 6, muestra un aerogenerador de eje horizontal, el tipo más común en aplicaciones comerciales debido a su alta eficiencia y capacidad de alineación con la dirección del viento.

Aerogeneradores de eje vertical (VAWT - Vertical Axis Wind Turbines)

Los aerogeneradores de eje vertical tienen su eje de rotación perpendicular al suelo, lo que les permite capturar el viento desde cualquier dirección sin necesidad de un sistema de orientación. Esta característica los hace adecuados para funcionar en entornos urbanos o en zonas donde los vientos son turbulentos o cambiantes. Aunque su eficiencia general es menor en comparación

con los aerogeneradores de eje horizontal, ofrecen ventajas importantes en espacios reducidos y condiciones complejas de flujo de viento (Manwell et al., 2010).

Figura 7

Aerogenerador de eje vertical (VAWT - Vertical Axis Wind Turbines)



Nota. Adaptado de OCU (2022).

La Figura 7, muestra un aerogenerador de eje vertical, diseñado para captar viento desde cualquier dirección.

b. Según el número de palas

- Aerogeneradores tripala: Ofrecen un equilibrio entre eficiencia y estabilidad.
- Aerogeneradores bipala: Son más económicos, pero generan más vibraciones.
- Aerogeneradores monopala: Son ligeros y requieren contrapesos, pero tienen menor eficiencia aerodinámica.

c. Según el medio en el que operan

Aerogeneradores terrestres (onshore)

- Se instalan en tierra firme, en zonas con vientos constantes.
- Son más accesibles en términos de instalación y mantenimiento.

Aerogeneradores marinos (offshore)

- Se ubican en el mar, donde los vientos son más fuertes y constantes.
- Son más eficientes, pero también más costosos de instalar y mantener.

2.2.7 Velocidades de operación de los aerogeneradores

La selección de las velocidades de viento es fundamental para evaluar el potencial energético eólico de una región y para el diseño adecuado de aerogeneradores. En el presente estudio, se tomaron como referencia los valores reportados por Yancachajlla (2019), quien analizó el comportamiento del viento en la ciudad de Juliaca a partir de datos registrados en la estación meteorológica de la Universidad Nacional de Juliaca (coordenadas: -15.489172, -70.152718). Mediante el uso de la distribución de Weibull y un análisis de frecuencias direccionales, se estimó el potencial eólico de la zona, identificándose que las velocidades de viento más representativas corresponden a 2 m/s y 6 m/s, con una dirección predominante hacia el oeste y suroeste.

Para un estudio experimental en túnel de viento o simulaciones computacionales, se pueden establecer las siguientes velocidades de referencia:

Tabla 1

Velocidades de referencia para estudios experimentales

Tipo de Prueba	Velocidad del viento (m/s)	Justificación
Baja velocidad	2 - 4	Representa el umbral de inicio del aerogenerador.
Velocidad intermedia	5 - 8	Zona de transición entre flujo laminar y turbulento.
Velocidad nominal	10 - 12	Condición de máxima eficiencia del aerogenerador.
Alta velocidad	15 - 20	Evaluación de estabilidad ante vientos fuertes.
Velocidad extrema	>20	Evaluación del sistema de frenado y resistencia estructural.

Nota. Adaptado de (OCU, 2022).

2.2.8 Materiales utilizados en las palas de aerogeneradores

Las palas de los aerogeneradores deben ser ligeras, resistentes y duraderas para soportar las cargas aerodinámicas y mecánicas. Los materiales más utilizados incluyen:

a) Fibra de vidrio

Es el material más común en palas de aerogeneradores debido a su buena relación resistencia-peso y su bajo coste.

b) Fibra de carbono

Este material es más resistente y ligero que la fibra de vidrio, pero tiene un coste más elevado.

c) Materiales compuestos (híbridos)

Se combinan fibra de vidrio y fibra de carbono para optimizar costos y rendimiento. Proporcionan resistencia estructural, flexibilidad y durabilidad, reduciendo el peso y mejorando la eficiencia aerodinámica.

2.2.9 Factores ambientales que afectan el rendimiento del aerogenerador

El desempeño de un aerogenerador depende de múltiples factores ambientales que influyen tanto en la cantidad de energía capturada del viento como en la vida útil del sistema (Manwell et al., 2010; Hau, 2013).

- Densidad del aire: La energía disponible en el viento es directamente proporcional a la densidad del aire, que a su vez varía según la altitud, temperatura y humedad. A mayor densidad, mayor energía puede extraerse del flujo (Gasch & Tvele, 2011).
- Turbulencia atmosférica: Las variaciones irregulares en la velocidad y dirección del viento generan cargas dinámicas sobre las palas, disminuyendo la eficiencia e incrementando el desgaste del aerogenerador (Burton et al., 2011).
- Efectos del terreno: Elementos como la rugosidad del suelo, obstáculos naturales o artificiales alteran el perfil del viento, provocando turbulencias y reduciendo la velocidad efectiva disponible para la conversión energética (Manwell et al., 2010; Spera, 2009).

2.2.10 Energía eólica

La energía eólica es una forma de energía renovable que se basa en el aprovechamiento de la energía cinética del viento para generar electricidad. Su captación es por medio de aerogeneradores que cuentan con grandes palas que capturan el viento y lo convierten en energía mecánica a través de su rotación. Esta energía mecánica se transforma luego en energía eléctrica mediante un generador (Manwell et al., 2010).

La potencia extraíble del viento, se puede calcular con la ecuación 1:

$$P_{eólica} = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad (1)$$

Dónde:

ρ : Densidad del aire (en kg/m^3)

A : Área barrida por las palas del aerogenerador (en m^2)

v^3 : Velocidad del viento (en m/s)

Para el cálculo de la densidad se utiliza la ecuación (2):

$$\rho = 1.225 \left(\frac{288}{T + 273} \right) e^{-\left(\frac{h}{8435}\right)} \quad (2)$$

Donde:

ρ es la densidad del aire

T es la temperatura del lugar,

h altura del lugar de estudio.

2.2.11 Coeficiente de Potencia (C_p)

El coeficiente de potencia C_p es una medida de la eficiencia con la que un aerogenerador convierte la energía cinética del viento en energía mecánica útil en el rotor. Se define como la relación entre la potencia extraída por el rotor y la potencia total disponible en el viento que atraviesa el área de barrido del rotor (Manwell et al., 2010). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_p = \frac{P_{real}}{P_{viento}} \quad (3)$$

Donde:

P_{real} : Potencia generada por el motor (W)

P_{viento} : Potencia total disponible en el viento (W)

2.2.12 Límite de Betz

El límite de Betz establece que el máximo C_p teórico es 0.593, lo que significa que ningún aerogenerador puede convertir más del 59.3% de la energía cinética del viento en energía

mecánica (Betz, 1920; Manwell et al., 2010). Cuando el viento interactúa con las palas de un aerogenerador, se transfiere energía. A medida que el viento atraviesa el rotor, su velocidad disminuye y su presión aumenta, lo que crea resistencia al flujo. Si se intentara capturar más energía, el viento se ralentizaría tanto que habría poca energía cinética disponible para aprovechar.

En la práctica, los aerogeneradores modernos alcanzan valores de C_p entre 0.35 y 0.45, dependiendo del diseño y las condiciones operativas.

2.2.13 Eficiencia eléctrica

La eficiencia eléctrica (η_e) es un indicador del rendimiento de conversión de un sistema generador, y se define como la razón entre la potencia eléctrica generada y la potencia disponible en el recurso energético (en este caso, el viento). Esta relación permite evaluar cuánta energía útil se obtiene a partir de la energía disponible y se expresa mediante la siguiente fórmula (Ackermann & Söder, 2002).

Esta se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_e = \frac{P_{eléctrica}}{P_{eólica}} \quad (4)$$

Donde:

$P_{eléctrica}$: $V * I$; V es la tensión eléctrica, I es la corriente.

2.2.14 Número de Reynolds

El número de Reynolds es un parámetro adimensional fundamental en la mecánica de fluidos que permite caracterizar el comportamiento de un fluido en diferentes condiciones de flujo (Manwell et al., 2010). Se define como la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas dentro del fluido, y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (5)$$

Donde:

ρ : es la densidad del fluido en kg/m^3

μ : es la viscosidad del fluido en Pa*s

L : es la dimensión característica del cuerpo en el flujo (por ejemplo, la cuerda aerodinámica en perfiles alares) en m

U : es la velocidad del flujo en m/s

$\nu = \mu/\rho$: es la viscosidad cinemática

El número de Reynolds es crucial porque permite determinar el régimen de flujo, que puede ser:

- **Flujo laminar ($Re < 2000$):** Se caracteriza por un movimiento ordenado y en capas paralelas, con mínima mezcla transversal. La fricción es baja y las pérdidas de energía son menores.

Figura 8

Flujo laminar



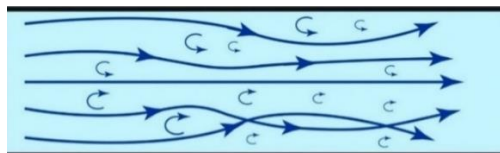
Nota. Adaptado de Fernández (2019).

La Figura 8, ilustra un flujo laminar caracterizado por líneas de corriente paralelas y ordenadas, típico a bajas velocidades, lo que favorece un comportamiento aerodinámico estable en perfiles delgados.

- **Flujo turbulento ($Re > 4000$):** Se distingue por movimientos caóticos y mezcla intensa dentro del fluido, lo que incrementa la resistencia al avance y las pérdidas energéticas.

Figura 9

Flujo turbulento



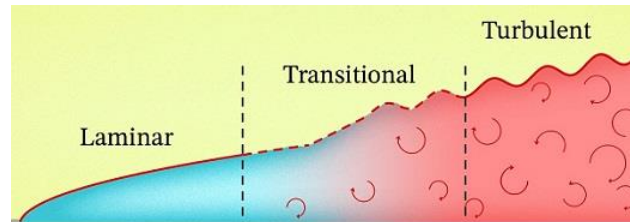
Nota. Adaptado de Fernández (2019).

La Figura 9, muestra un flujo turbulento, caracterizado por trayectorias irregulares y mezcla de partículas, lo cual incrementa el arrastre sobre los perfiles y reduce su eficiencia.

- **Zona de transición ($2000 < Re < 4000$):** Un régimen intermedio donde el flujo puede cambiar entre laminar y turbulento dependiendo de perturbaciones externas.

Figura 10

Zona de transición



Nota. Adaptado de Chandler (2020).

En la Figura 10, se representa la zona de transición entre flujo laminar y turbulento, donde el comportamiento del aire es inestable y puede afectar negativamente la sustentación y el control aerodinámico.

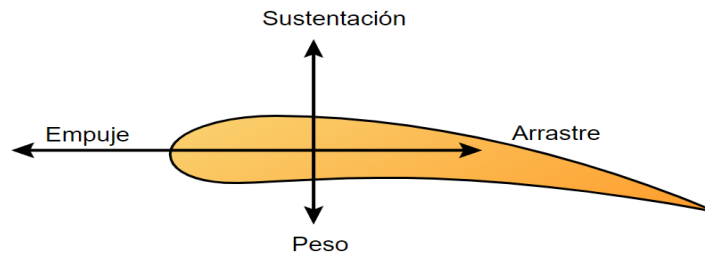
En aplicaciones aerodinámicas, el número de Reynolds es determinante en el análisis del comportamiento de perfiles alares y aerogeneradores, ya que afecta los coeficientes de sustentación (C_l) y arrastre (C_d), así como la eficiencia del sistema. Específicamente en estudios de turbinas eólicas, el Re influye en la separación de flujo, la aparición de turbulencias y la estabilidad del rendimiento aerodinámico de las palas.

2.2.15 Fuerzas aerodinámicas

Las fuerzas aerodinámicas son las fuerzas que actúan sobre un objeto en movimiento en un fluido, como el aire. Estas fuerzas se generan debido a la interacción entre el objeto y el flujo de aire que lo rodea.

Figura 11

Fuerzas sobre un perfil aerodinámico



Nota. Adaptado de Amada44 (2007).

La Figura 11, muestra las principales fuerzas que actúan sobre un perfil aerodinámico en movimiento: sustentación, arrastre, peso y fuerza lateral, fundamentales para evaluar su eficiencia y estabilidad en flujo de aire.

- **Sustentación:** La sustentación es la fuerza vertical que se opone a la gravedad y permite que una aeronave o un vehículo mantenga altitudes o velocidades constantes.
- **Peso:** Esta fuerza es perpendicular a la superficie de la Tierra, apunta hacia abajo y su intensidad es proporcional a la masa del objeto (Muñoz, 2018).
- **Empuje:** Es la fuerza aerodinámica que actúa perpendicularmente al flujo de aire y de manera lateral al movimiento del objeto. Es la fuerza que impulsa el perfil hacia adelante
- **Arrastre:** es la fuerza que se opone al movimiento del perfil a través del aire y consume energía.

2.2.16 Eficiencia aerodinámica

La eficiencia aerodinámica consiste en lograr la máxima sustentación con la menor resistencia al avance posible al moverse en un flujo de aire. Se evalúa considerando la relación entre la sustentación y la resistencia, generadas por el perfil. Las variables clave en la evaluación de la eficiencia aerodinámica son los coeficientes de sustentación (C_l) y de resistencia (C_d), que se relacionan con las características del perfil y su interacción con el flujo de aire (García, 2010).

$$E = \frac{L}{D} \quad (6)$$

Dónde:

E: es la eficiencia

L: es la sustentación generada por el perfil.

D: es la resistencia al avance del perfil.

La relación de eficiencia por excelencia es la relación de sustentación a resistencia (L/D). Un perfil aerodinámico eficiente tendrá una relación L/D alta, lo que indica que puede generar una cantidad significativa de sustentación en comparación con la resistencia que genera. Una relación L/D alta se traduce en un menor consumo de energía para mantener una determinada velocidad y altitud (García, 2010).

2.2.17 Coeficiente de sustentación C_l

Es una medida de la capacidad de un perfil para generar sustentación en función del ángulo de ataque. Mayor C_l indica una mayor capacidad de generación de sustentación (García, 2010).

Para el cálculo de la ecuación 6, se utiliza:

$$L = 0.5 \rho V^2 A C_l \quad (7)$$

Donde:

ρ : es la densidad del fluido

V : es la velocidad del flujo

A : es el área de referencia del perfil expuesto al flujo

C_l : es el coeficiente de sustentación

2.2.18 Coeficiente de arrastre C_d

Indica la resistencia al avance del perfil en función del ángulo de ataque y la velocidad del viento. Menor C_d indica menor resistencia al avance (García, 2010).

Para el cálculo de la ecuación 6, se utiliza:

$$D = 0.5 \rho V^2 A C_d \quad (8)$$

Donde:

ρ : es la densidad del fluido

V : es la velocidad del flujo

A : es el área de referencia del perfil expuesto al flujo

C_d : es el coeficiente de resistencia

2.2.19 Perfiles aerodinámicos NACA

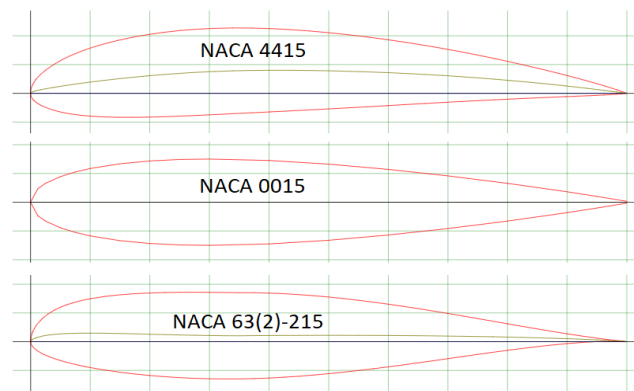
Los perfiles aerodinámicos se refieren a las formas específicas de las secciones transversales diseñadas para interactuar con el flujo de aire de manera eficiente y generar fuerzas aerodinámicas deseables. Suelen tener una forma curvada y asimétrica, conocida como forma de ala. La curvatura superior e inferior de la sección transversal permite que el flujo de aire se acelere sobre la superficie superior y se desacelere sobre la inferior, generando sustentación (Anderson, 2010).

El Comité Asesor Nacional para la Aeronáutica (NACA, por sus siglas en inglés) fue una organización establecida en marzo de 1915 en Estados Unidos. Desempeñó un papel fundamental en el campo de la aerodinámica al desarrollar investigaciones sobre perfiles de ala y túneles de viento. La NACA fue la precursora de la actual Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) y se disolvió en octubre de 1958, transfiriendo sus proyectos e instalaciones a dicha agencia (Cumulonimbo, 2017).

Uno de sus logros más relevantes fue el desarrollo de los perfiles NACA, los cuales se identifican mediante una nomenclatura numérica que define sus características geométricas. Estas series incluyen los perfiles de 4 cifras, 5 cifras, y de las series 1, 6, 7 y 8, cada una diseñada para condiciones aerodinámicas específicas. Los perfiles NACA han sido ampliamente utilizados en ingeniería aeronáutica y en sistemas de conversión de energía eólica debido a su elevada eficiencia aerodinámica (Abbott & Von Doenhoff, 1959).

Figura 12

Perfiles aerodinámicos NACA



Nota. Adaptado de Tools (2023).

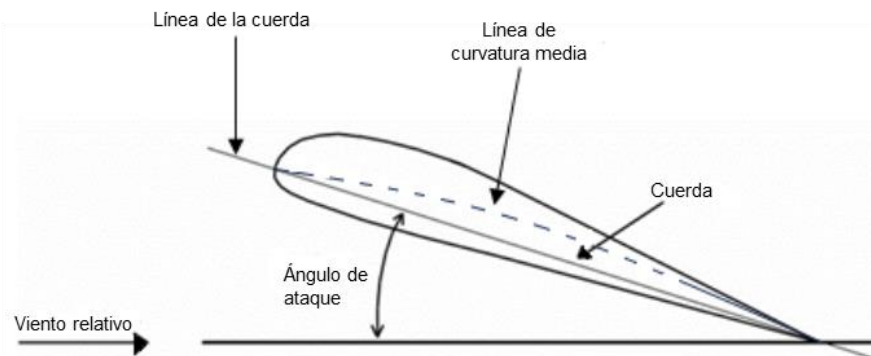
La Figura 12, presenta distintos perfiles aerodinámicos NACA, cada uno con geometrías específicas que influyen directamente en su comportamiento frente al flujo de aire, determinando su eficiencia de sustentación y arrastre.

A continuación, analizaremos la importancia que posee la forma y la inclinación del perfil en relación con la dirección del flujo de aire usando la terminología definida por (Carmona, 2000). Estos factores se muestran en la figura 13, y desempeñan un papel fundamental en la generación de la fuerza de sustentación a través de la distribución de presiones.

- **Cuerda:** Es la línea recta que une el borde de ataque con el borde de salida.
- **Línea de curvatura media:** La línea de curvatura media es una línea equidistante entre el extradós y el intradós de un perfil aerodinámico. Su forma determina la curvatura del perfil, que puede ser positiva o negativa.
- **Ángulo de ataque:** es aquel que existe en la cuerda, y la dirección de la corriente libre de aire.

Figura 13

Terminología del perfil aerodinámico



Nota. Adaptado de Pablo (2012).

La NACA dejó un legado significativo en la historia de la aeronáutica, sus investigaciones y desarrollos sentaron las bases para los avances posteriores en la aviación y allanaron el camino para el establecimiento de la NASA como la principal agencia espacial y aeronáutica de Estados Unidos (Cumulonimbo, 2017).

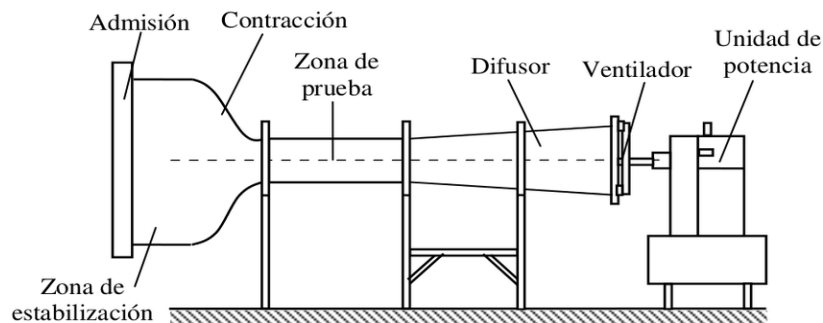
2.2.20 Túnel de viento

Los túneles de viento se remontan al siglo XIX, cuando en 1871, el ingeniero británico Francis Herbert Wenham diseñó y construyó el primer túnel de viento conocido. Este túnel era de pequeña escala y se utilizaba principalmente para investigar la aerodinámica de los perfiles alares. A partir de ese momento, se comenzaron a desarrollar túneles de viento más grandes y sofisticados (González, Esteban, & Baldera, 2014).

El principio de funcionamiento básico de un túnel de viento se basa en generar un flujo de aire controlado y reproducible para simular condiciones específicas y evaluar el comportamiento aerodinámico de diferentes objetos frente al viento. Los túneles de viento modernos pueden simular diferentes condiciones de viento, ajustar la velocidad y dirección del flujo de aire, y contar con instrumentación avanzada para medir fuerzas y presiones aerodinámicas, desempeñando un papel fundamental en diversas industrias y campos de investigación. Las partes características de un túnel de viento se observan en la figura 14.

Figura 14

Partes características de un túnel de viento



Nota. Adaptado de González, Esteban, & Baldera (2014).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Hipótesis de la investigación

3.1.1 Hipótesis general

- Dado que existe una gran variedad de perfiles aerodinámicos NACA, es posible analizar y determinar el perfil más eficiente entre los doce seleccionados bajo condiciones de viento variable y estable, utilizando el túnel de viento de la EPIER.

3.1.2 Hipótesis específicas

- El software QBlade puede emplearse para evaluar los coeficientes de sustentación y arrastre de diseño de los perfiles aerodinámicos NACA.
- Gracias a los avances en técnicas y tecnologías de fabricación, es posible construir doce juegos de perfiles aerodinámicos mediante impresión 3D, asegurando una representación fiel de su geometría y características aerodinámicas.
- Debido a la variabilidad de las condiciones de viento, la utilización del túnel de viento de la EPIER permitirá simular de manera controlada condiciones de viento variable y estable.

3.2 Metodología

3.2.1 Tipo, nivel y diseño de investigación

De acuerdo con la clasificación de Hernández (2014), esta investigación es de tipo experimental, ya que se manipuló de manera controlada una variable independiente (el tipo de perfil aerodinámico) para observar su efecto sobre la eficiencia del aerogenerador. El nivel de investigación es explicativo, dado que busca establecer relaciones de causalidad entre las variables. Se utilizó un diseño de medidas repetidas, donde cada perfil fue sometido a las mismas condiciones de prueba.

3.2.2 Ámbito del proyecto

El presente proyecto se desarrolló en el Laboratorio de Energía Eólica de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables, ubicado en la sede Ayabacas de la Universidad Nacional de Juliaca, a una altitud de 3,832 m s.n.m. (coordenadas geográficas: -15.40892641° latitud, -70.09352157° longitud). La elección de esta ubicación respondió principalmente a la disponibilidad del túnel de viento, instrumento esencial para la fase experimental del estudio. El entorno controlado del laboratorio permitió replicar condiciones específicas de flujo de viento y garantizar la obtención de datos válidos y comparables para la evaluación del rendimiento aerodinámico y eléctrico de los perfiles seleccionados.

3.2.3 Población y muestra

La población del estudio estuvo constituida por perfiles aerodinámicos de la familia NACA, empleados comúnmente en aplicaciones de aerogeneradores de eje horizontal. La muestra seleccionada incluyó doce perfiles específicos, tanto simétricos como asimétricos, así como modelos modificados, elegidos por su potencial aerodinámico y su disponibilidad en bases de datos reconocidas. La selección se basó en criterios de diversidad geométrica, aplicabilidad a condiciones de viento variable y antecedentes de uso en tecnologías de pequeña escala. Estos perfiles fueron evaluados de manera uniforme bajo un mismo conjunto de condiciones experimentales y de simulación, lo que permitió una comparación directa de su eficiencia aerodinámica y eléctrica.

3.2.4 Operacionalización de variables

En la Tabla 2 se muestra la operacionalización de cada variable.

Tabla 2

Operacionalización de las variables

Variables	Dimensiones	Indicadores	Unidades
Dependiente: Eficiencia del aerogenerador	Eficiencia eléctrica	Potencia	Watts (W)
		Tensión	Voltios (V)
		Corriente	Amperios (I)
Independiente: Perfiles aerodinámicos	Coeficiente de sustentación – arrastre en QBlade	Cálculos matemáticos	Unid
		Dimensiones	Unid
	Perfiles NACA	0006, 0008-34, 0024, 4412, 4424, 6412, 6H20, 16021, 66021, 63(2) A-015, 11H09, 64(1)-212 MOD A	
	Construcción de perfiles	Materiales	PLA
		Dimensiones	Unid
	Simulaciones	Túnel de viento	Unid
		Velocidad de viento	m/s
		Anemómetro	m/s

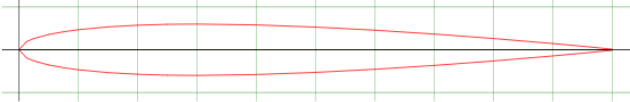
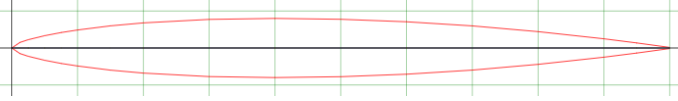
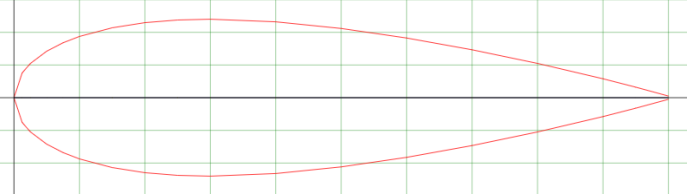
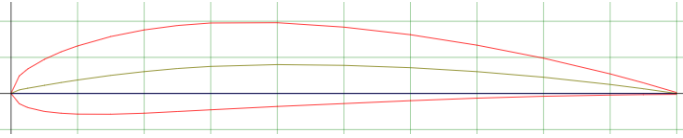
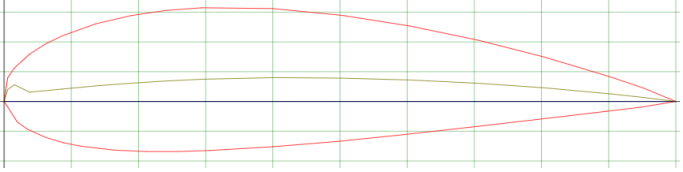
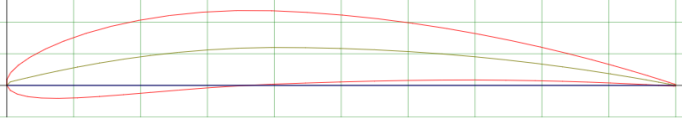
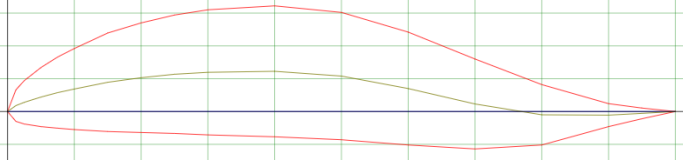
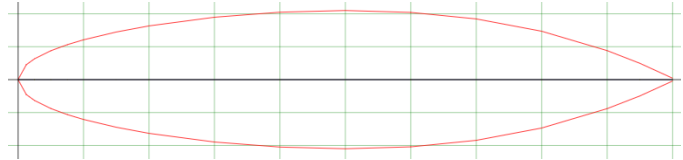
Nota: Elaboración propia. Unid = Unidades.

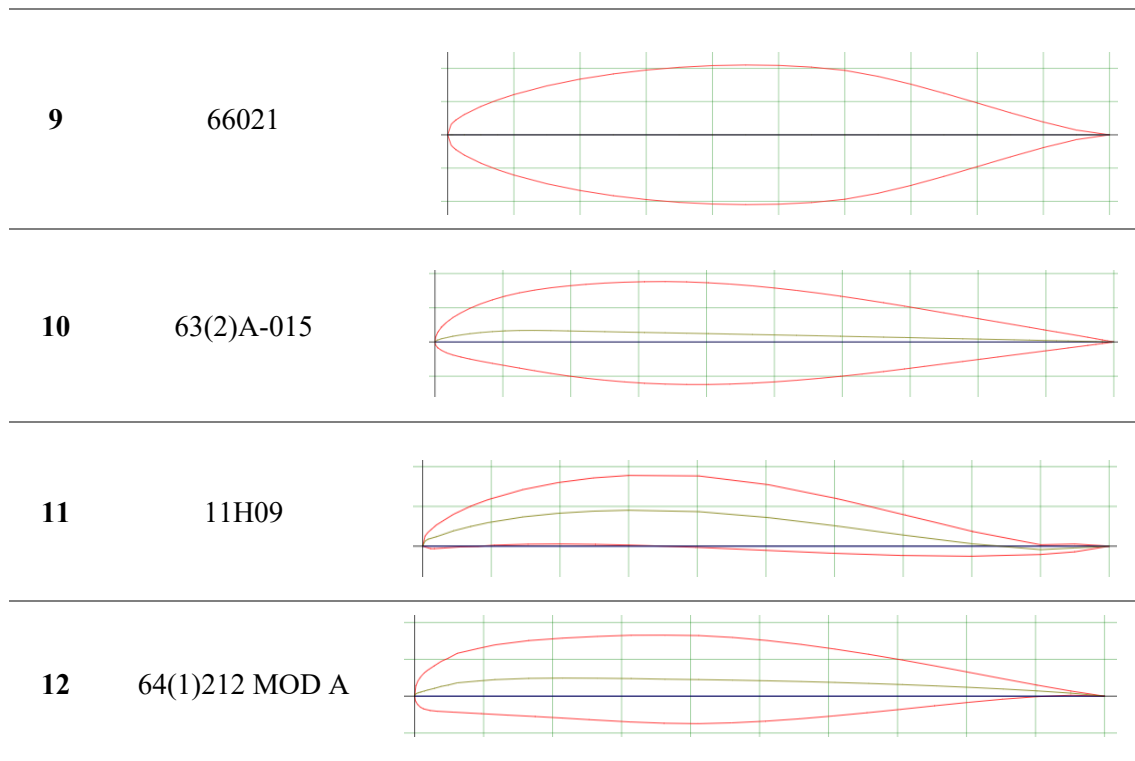
3.3 Simulación aerodinámica de perfiles NACA en Software QBlade

El software QBlade v0.963 es un software libre y de código abierto diseñado para el análisis aerodinámico de aerogeneradores. Una de sus principales ventajas es que no requiere instalación compleja ni gran capacidad de almacenamiento, ya que es un programa ligero, portable y compatible con sistemas Windows. Además, su interfaz gráfica es intuitiva y amigable, lo que permite realizar simulaciones, diseñar perfiles aerodinámicos y evaluar el desempeño de rotores de forma accesible y didáctica. Fue empleado para realizar análisis aerodinámicos previos a los ensayos experimentales. Para ello, se modelaron los perfiles NACA utilizando coordenadas descargadas de Airfoil Tools, que luego se importaron al entorno de QBlade.

Se realizaron análisis en 2D para obtener los coeficientes de sustentación (C_l) y de arrastre (C_d). Posteriormente, se calculó la relación L/D para cada perfil con el objetivo de evaluar su eficiencia aerodinámica.

Tabla 3*Perfiles aerodinámicos NACA seleccionados para la experimentación*

Nº	Código del perfil NACA	Imagen del perfil
1	0006	
2	0008-34	
3	0024	
4	4412	
5	4424	
6	6412	
7	6H20	
8	16021	



Nota: Relación de perfiles aerodinámicos NACA seleccionados con base en su diversidad geométrica que fueron utilizados tanto en simulaciones como en pruebas experimentales. Elaboración propia adaptado de Tools (2023).

Las simulaciones se realizaron calculando un número de Reynolds acorde a las velocidades (3 a 12 m/s), con una densidad de aire ajustada a las condiciones atmosféricas de Juliaca. Para cada perfil se generaron curvas L/D.

Cálculo de número de Reynolds

Para el cálculo del número de Reynolds se utilizó la ecuación (4):

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu}$$

Para la densidad se reemplazó en la ecuación (2), y se obtuvo:

$$\rho = 0.797 \text{ kg/m}^3$$

1. Cálculo de número de Reynolds NACA 0006

La tabla 4, muestra el número de Reynolds para el NACA 0006 en función de diferentes velocidades de viento.

Tabla 4

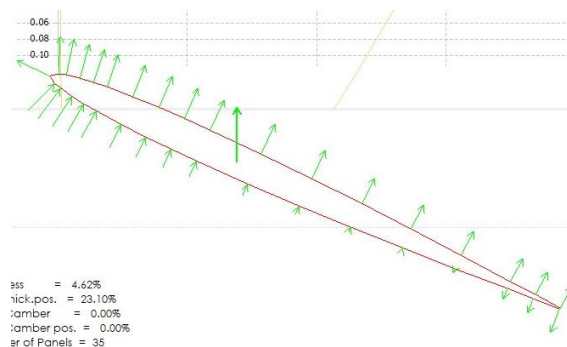
Número de Reynolds para el perfil NACA 0006

	U (m/s)	ρ (kg/m ³)	L (m)	μ (Pa*s)	Reynolds
0006	3	0.797	0.077	0.00001758	10367
	4				13823
	5				17279
	6				20735
	7				24191
	8				27646
	9				31102
	10				34558
	11				38014
	12				41470

Nota: U = velocidad del viento; ρ = densidad del aire; L = longitud característica (cuerda del perfil); μ = viscosidad del fluido. Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en simulaciones con QBlade.

Figura 15

Simulación en QBlade NACA 0006



Nota. Elaboración propia a partir de simulación en QBlade.

La Figura 15, muestra la distribución de fuerzas aerodinámicas sobre el perfil NACA 0006, simulada en QBlade. Las flechas verdes representan vectores de fuerza dispuestos simétricamente, en concordancia con la ausencia de curvatura del perfil. Con un espesor máximo del 4,62 % de la cuerda ubicado al 23,10 %, este perfil simétrico es adecuado para superficies de control o aplicaciones que requieran baja resistencia.

2. Cálculo de número de Reynolds NACA 0008-34

Tabla 5

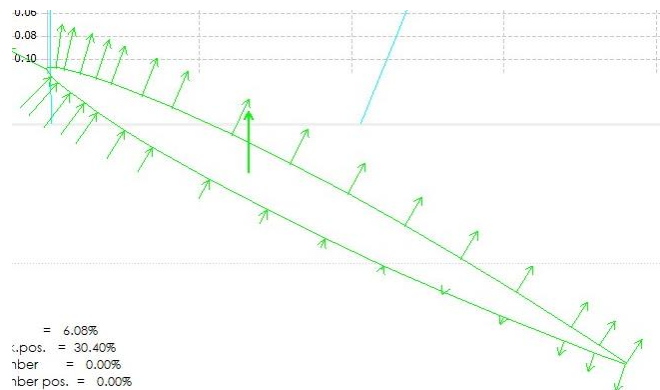
Número de Reynolds para el perfil NACA 0008-34

	U (m/s)	ρ (kg/m ³)	L (m)	μ (Pa*s)	Reynolds
0008-34	3	0.797	0.076	0.00001758	10233
	4				13644
	5				17055
	6				20466
	7				23876
	8				27287
	9				30698
	10				34109
	11				37520
	12				40931

Nota: U = velocidad del viento; ρ = densidad del aire; L = longitud característica (cuerda del perfil); μ = viscosidad del fluido. Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en simulaciones con QBlade.

Figura 16

Simulación en QBlade NACA 0008-34



Nota. Elaboración propia a partir de simulación en QBlade.

La Figura 16, muestra la distribución de fuerzas aerodinámicas sobre el perfil NACA 0008-34, obtenida mediante simulación en QBlade. La simetría de los vectores de fuerza refleja su configuración sin curvatura y su comportamiento neutro. El perfil presenta un espesor máximo del 6,08 % al 30,40 % de la cuerda.

3. Cálculo de número de Reynolds NACA 0024

Tabla 6

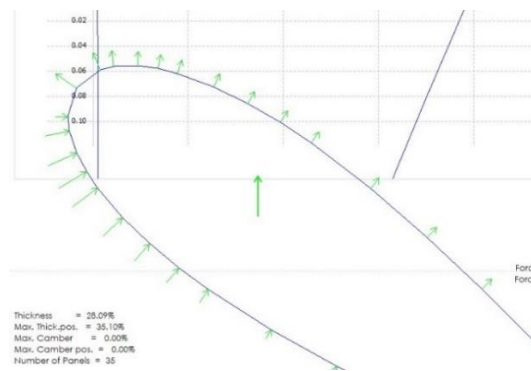
Número de Reynolds para el perfil NACA 0024

	U (m/s)	ρ (kg/m ³)	L (m)	μ (Pa*s)	Reynolds
0024	3	0.797	0.0117	0.00001758	1575
	4				2100
	5				2626
	6				3151
	7				3676
	8				4201
	9				4726
	10				5251
	11				5776
	12				6301

Nota: U = velocidad del viento; ρ = densidad del aire; L = longitud característica (cuerda del perfil); μ = viscosidad del fluido. Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en simulaciones con QBlade y pruebas experimentales.

Figura 17

Simulación en QBlade NACA 0024



Nota. Elaboración propia a partir de simulación en QBlade.

La Figura 17, muestra la distribución de fuerzas aerodinámicas sobre el perfil NACA 0024, simulada en QBlade. Los vectores muestran una acción simétrica sobre ambas superficies, coherente con su geometría sin curvatura. Este perfil presenta un espesor máximo del 26,09 % al 35,10 % de la cuerda, siendo típico en superficies de control y aplicaciones que requieren respuesta neutra.

4. Cálculo de número de Reynolds NACA 4412

Tabla 7

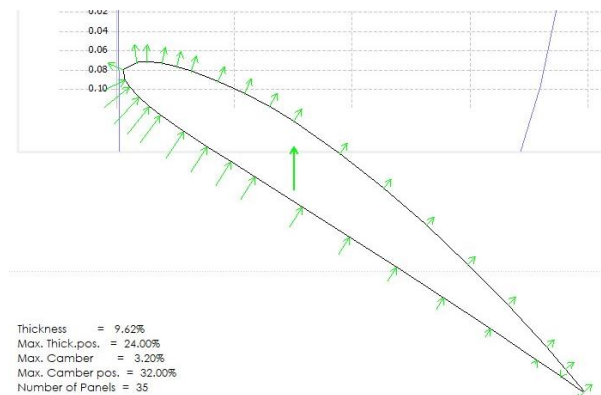
Número de Reynolds para el perfil NACA 4412

	U (m/s)	ρ (kg/m ³)	L (m)	μ (Pa*s)	Reynolds
4412	3	0.797	0.08	0.00001758	10771
	4				14362
	5				17952
	6				21543
	7				25133
	8				28724
	9				32314
	10				35904
	11				39495
	12				43085

Nota: U = velocidad del viento; ρ = densidad del aire; L = longitud característica (cuerda del perfil); μ = viscosidad del fluido. Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en simulaciones con QBlade y pruebas experimentales.

Figura 18

Simulación en QBlade NACA 4412



Nota. Elaboración propia a partir de simulación en QBlade.

La Figura 18, muestra la distribución de fuerzas aerodinámicas sobre el perfil NACA 4412, simulada en QBlade. Los vectores muestran un flujo adherido y estable sobre ambas superficies. El perfil presenta un espesor máximo del 9,62 % al 24 % de la cuerda y una curvatura del 3,20 % al 32 %, lo que favorece un buen equilibrio entre sustentación y eficiencia.

5. Cálculo de número de Reynolds NACA 4424

Tabla 8

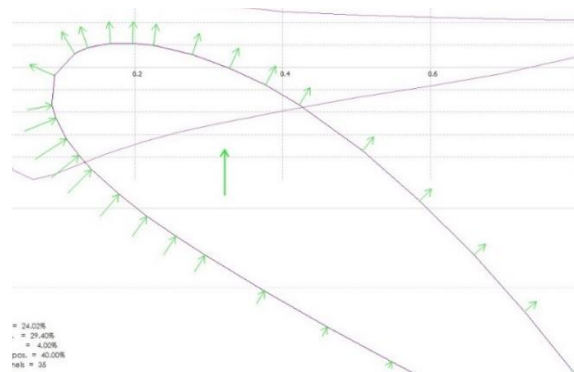
Número de Reynolds para el perfil NACA 4424

	U (m/s)	ρ (kg/m ³)	L (m)	μ (Pa*s)	Reynolds
4424	3	0.797	0.1	0.00001758	13464
	4				17952
	5				22440
	6				26928
	7				31416
	8				35904
	9				40392
	10				44881
	11				49369
	12				53857

Nota: U = velocidad del viento; ρ = densidad del aire; L = longitud característica (cuerda del perfil); μ = viscosidad del fluido. Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en simulaciones con QBlade y pruebas experimentales.

Figura 19

Simulación en QBlade NACA 4424



Nota. Elaboración propia a partir de simulación en QBlade.

La Figura 19, muestra la distribución de fuerzas aerodinámicas sobre el perfil NACA 4424, simulada en QBlade. Los vectores muestran un flujo adherido y estable, coherente con su diseño. Presenta un espesor máximo del 24,02 % al 24,02 % de la cuerda y una curvatura del 4,00 % al 40,00 %, lo que lo hace apto para aplicaciones de alta sustentación.

6. Cálculo de número de Reynolds NACA 6412

Tabla 9

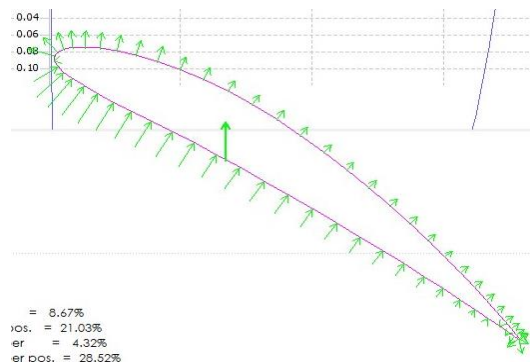
Número de Reynolds para el perfil NACA 6412

	U (m/s)	ρ (kg/m ³)	L (m)	μ (Pa*s)	Reynolds
6412	3	0.797	0.072	0.00001758	9694
	4				12926
	5				16157
	6				19388
	7				22620
	8				25851
	9				29083
	10				32314
	11				35545
	12				38777

Nota: U = velocidad del viento; ρ = densidad del aire; L = longitud característica (cuerda del perfil); μ = viscosidad del fluido. Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en simulaciones con QBlade y pruebas experimentales.

Figura 20

Simulación en QBlade NACA 6412



Nota. Elaboración propia a partir de simulación en QBlade.

La Figura 20, muestra la distribución de fuerzas aerodinámicas sobre el perfil NACA 6412, obtenida en QBlade. Las fuerzas locales evidencian un flujo adherido y estable. El perfil presenta un espesor máximo del 8,67 % al 21,03 % de la cuerda y una curvatura del 4,32 % al 28,52 %, adecuado para aplicaciones con demanda de buena sustentación en flujo laminar.

7. Cálculo de número de Reynolds NACA 6H20

Tabla 10

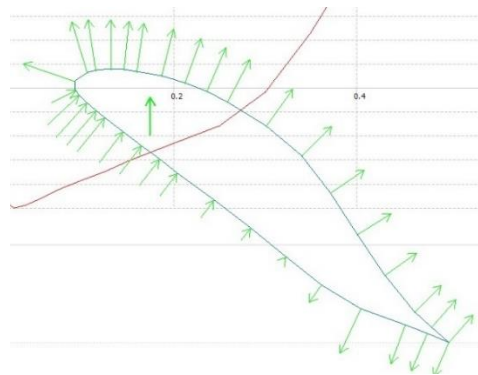
Número de Reynolds para el perfil NACA 6H20

	U (m/s)	ρ (kg/m ³)	L (m)	μ (Pa*s)	Reynolds
6H20	3	0.797	0.08	0.00001758	10771
	4				14362
	5				17952
	6				21543
	7				25133
	8				28724
	9				32314
	10				35904
	11				39495
	12				43085

Nota: U = velocidad del viento; ρ = densidad del aire; L = longitud característica (cuerda del perfil); μ = viscosidad del fluido. Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en simulaciones con QBlade y pruebas experimentales.

Figura 21

Simulación en QBlade NACA 6H20



Nota. Elaboración propia a partir de simulación en QBlade.

La Figura 21, muestra la distribución de fuerzas aerodinámicas sobre el perfil NACA 6H20, simulada en QBlade. Las fuerzas locales indican flujo mayormente adherido y buena estabilidad. El perfil presenta un espesor del 9,98 % al 20 % de la cuerda y una curvatura del 3,06 % en la misma posición, lo que sugiere un diseño equilibrado entre sustentación y control del arrastre.

8. Cálculo de número de Reynolds NACA 16021

Tabla 11

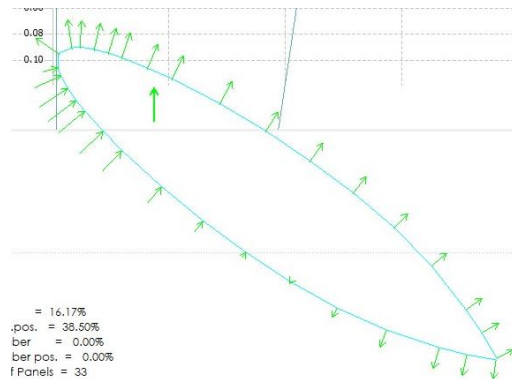
Número de Reynolds para el perfil NACA 16021

	U (m/s)	ρ (kg/m ³)	L (m)	μ (Pa*s)	Reynolds
16021	3	0.797	0.077	0.00001758	10367
	4				13823
	5				17279
	6				20735
	7				24191
	8				27646
	9				31102
	10				34558
	11				38014
	12				41470

Nota: U = velocidad del viento; ρ = densidad del aire; L = longitud característica (cuerda del perfil); μ = viscosidad del fluido. Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en simulaciones con QBlade y pruebas experimentales.

Figura 22

Simulación en QBlade NACA 16021



Nota. Elaboración propia a partir de simulación en QBlade.

La Figura 22, muestra la distribución de fuerzas del perfil NACA 16021 simulada en QBlade. Las líneas de flujo indican adherencia estable sobre un perfil simétrico, sin curvatura. Presenta un espesor máximo del 16,17 % de la cuerda al 38,5 %.

9. Cálculo de número de Reynolds NACA 66021

Tabla 12

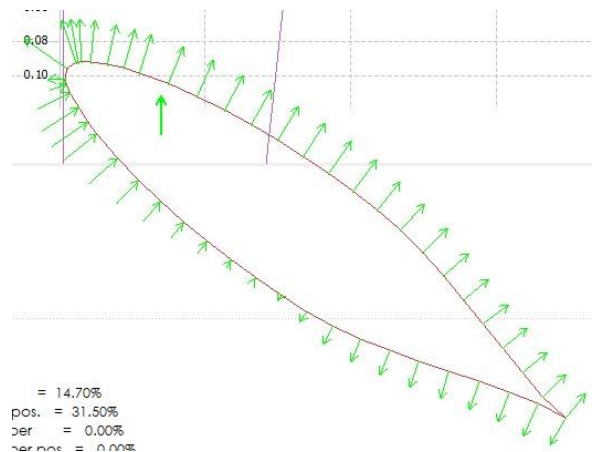
Número de Reynolds para el perfil NACA 66021

	U (m/s)	ρ (kg/m ³)	L (m)	μ (Pa*s)	Reynolds
66021	3	0.797	0.067	0.00001758	9021
	4				12028
	5				15035
	6				18042
	7				21049
	8				24056
	9				27063
	10				30070
	11				33077
	12				36084

Nota: U = velocidad del viento; ρ = densidad del aire; L = longitud característica (cuerda del perfil); μ = viscosidad del fluido. Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en simulaciones con QBlade y pruebas experimentales.

Figura 23

Simulación en QBlade NACA 66021



Nota. Elaboración propia a partir de simulación en QBlade.

La Figura 23, muestra la distribución de fuerzas aerodinámicas del perfil NACA 66021 simulada en QBlade. Las flechas muestran un flujo adherido y simétrico, consistente con su curvatura nula. Presenta un espesor máximo del 14,70 % de la cuerda, ubicado al 31,50 %, lo que lo hace adecuado para aplicaciones con flujo bidireccional y respuesta aerodinámica equilibrada.

10. Cálculo de número de Reynolds NACA 63(2)A-015

Tabla 13

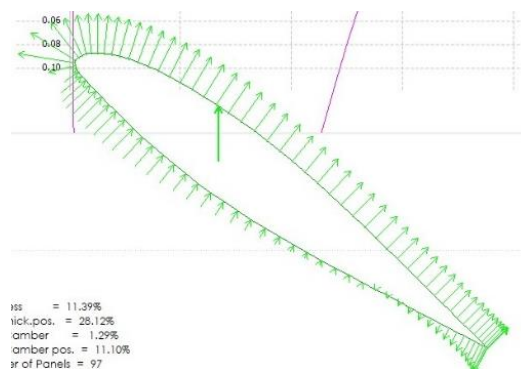
Número de Reynolds para el perfil NACA 63(2)A-015

	U (m/s)	ρ (kg/m ³)	L (m)	μ (Pa*s)	Reynolds
63(2)A-015	3	0.797	0.078	0.00001758	10502
	4				14003
	5				17503
	6				21004
	7				24505
	8				28005
	9				31506
	10				35007
	11				38508
	12				42008

Nota: U = velocidad del viento; ρ = densidad del aire; L = longitud característica (cuerda del perfil); μ = viscosidad del fluido. Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en simulaciones con QBlade y pruebas experimentales.

Figura 24

Simulación en QBlade NACA 63(2)A-015



Nota. Elaboración propia a partir de simulación en QBlade.

La Figura 24, muestra la distribución de fuerzas aerodinámicas sobre el perfil NACA 63(2)A-015 simulada en QBlade. Se observa un flujo adherido y estable en ambas superficies. El perfil presenta un espesor máximo del 11,39 % de la cuerda al 28,12 % y una curvatura máxima del 1,29 % al 11,10 %, lo que sugiere un diseño de baja curvatura optimizado para minimizar el arrastre.

11. Cálculo de número de Reynolds NACA 11H09

Tabla 14

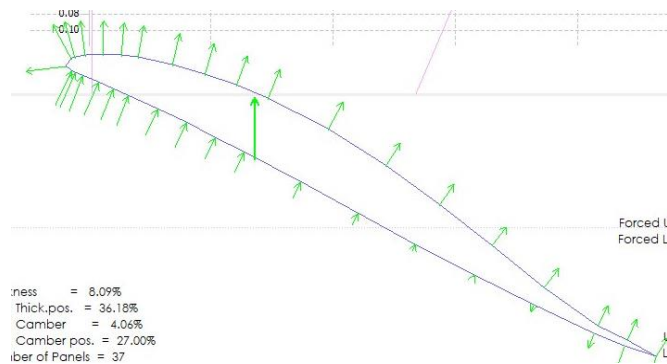
Número de Reynolds para el perfil NACA 11H09

	U (m/s)	ρ (kg/m ³)	L (m)	μ (Pa*s)	Reynolds
11H09	3	0.797	0.09	0.00001758	12118
	4				16157
	5				20196
	6				24235
	7				28275
	8				32314
	9				36353
	10				40392
	11				44432
	12				48471

Nota: U = velocidad del viento; ρ = densidad del aire; L = longitud característica (cuerda del perfil); μ = viscosidad del fluido. Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en simulaciones con QBlade y pruebas experimentales.

Figura 25

Simulación en QBlade NACA 11H09



Nota. Elaboración propia a partir de simulación en QBlade.

La Figura 25, muestra la distribución de fuerzas aerodinámicas sobre el perfil NACA 11H09 simulada en QBlade. Se observa un flujo adherido y estable en ambas superficies. El perfil posee un espesor máximo del 8,09 % de la cuerda al 36,18 % y una curvatura máxima del 4,06 % al 27 %, lo que permite un equilibrio entre buena sustentación y bajo arrastre.

12. Cálculo de número de Reynolds NACA 64(1)212MOD-A

Tabla 15

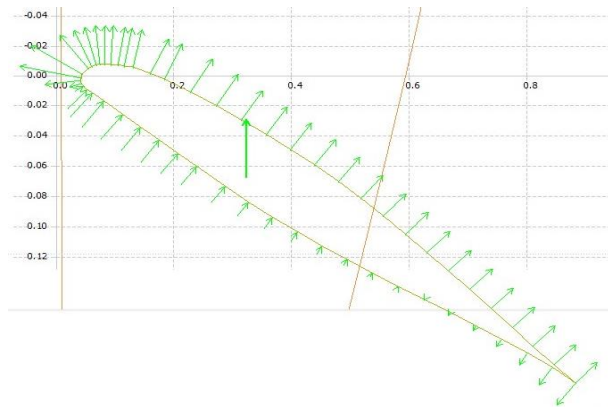
Número de Reynolds para el perfil NACA 64(1)212MOD-A

	U (m/s)	ρ (kg/m ³)	L (m)	μ (Pa*s)	Reynolds
64(1)212 MOD A	3	0.797	0.086	0.00001758	11579
	4				15439
	5				19299
	6				23158
	7				27018
	8				30878
	9				34738
	10				38597
	11				42457
	12				46317

Nota: U = velocidad del viento; ρ = densidad del aire; L = longitud característica (cuerda del perfil); μ = viscosidad del fluido. Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en simulaciones con QBlade y pruebas experimentales.

Figura 26

Simulación en QBlade NACA 64(1)212 MOD A

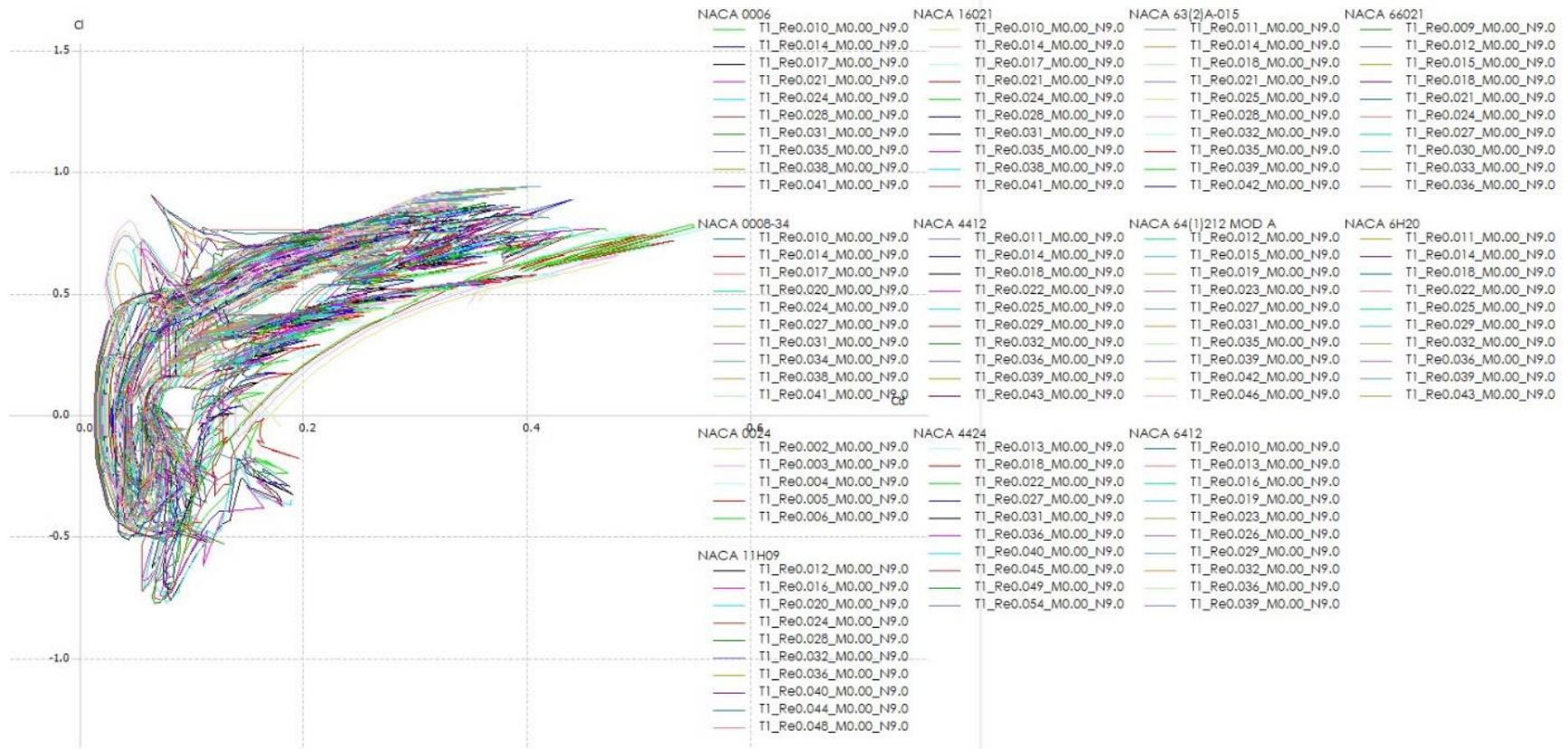


Nota. Elaboración propia a partir de simulación en QBlade.

La Figura 26, muestra la distribución de fuerzas aerodinámicas sobre el perfil NACA 64(1)212 MOD A simulada en QBlade. Las flechas muestran un flujo adherido y estable. El espesor máximo es del 10,29 % de la cuerda, ubicado al 35,26 %.

Figura 27

Simulación en QBlade (Cl vs. Cd) de perfiles NACA



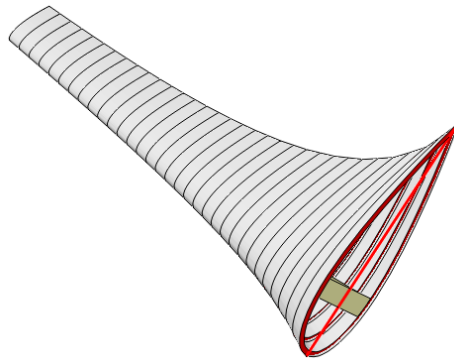
Nota: Cl es el coeficiente de sustentación, Cd es el coeficiente de arrastre. El aumento del número de Reynolds mejoró el rendimiento en la mayoría de los casos. Elaboración propia a partir de simulación en QBlade.

3.4 Fabricación de Perfiles Aerodinámicos mediante Impresión 3D

Para la fabricación de los perfiles aerodinámicos, cada perfil se modeló a escala según sus coordenadas NACA en el software Qblade del cual posteriormente, los modelos fueron exportados en formato STL y finalmente ser impresos con tecnología 3D. Se utilizó filamento de material PLA, debido a su facilidad de impresión.

Figura 28

Perfil NACA 0024 modelado en QBlade en formato STL



Nota. Elaboración propia.

Se construyeron 12 juegos completos, uno por cada tipo de perfil (Ver tabla 40).

Figura 29

Perfiles aerodinámicos impresos en material PLA



Nota. Elaboración propia.

La Figura 29, muestra los modelos físicos de los perfiles NACA fabricados mediante impresión 3D en PLA, utilizados en los ensayos experimentales.

3.5 Evaluación experimental en túnel de viento

Cada perfil fue instalado por separado en el aerogenerador de prueba. Se ajustó la velocidad del viento de 3 a 12 m/s con incrementos de 1 m/s con ayuda del anemómetro y se realizaron mediciones de tensión y corriente a intervalos de un minuto. Todos los datos fueron registrados manualmente en una libreta de campo para su posterior procesamiento. Con el objetivo de reducir errores y aumentar la fiabilidad, cada medición se repitió cinco veces por condición de velocidad.

Las pruebas se realizaron en el túnel de viento del laboratorio de energía eólica. La temperatura promedio del ambiente fue de 8 °C, con una densidad del aire estimada de 0.797 kg/m³. Se mantuvo un flujo de aire constante durante cada prueba.

Se utilizó el túnel de viento modelo WIND-TU2/EV para realizar pruebas con los perfiles en condiciones controladas.

Figura 30

Túnel de viento WIND-TU2/EV



Nota. Elaboración propia.

Cálculo de caudal de aire

Para el cálculo del caudal del aire procesado por el motor eléctrico del túnel de viento, empleamos la siguiente ecuación (9):

$$\dot{V} = A * v * 3600s/h$$

Donde: A es la sección expresada en m².

Esta fórmula es válida únicamente si la velocidad del flujo es constante en toda la sección. Para una estimación más precisa del caudal en conductos rectangulares, se recomienda el método de rejilla descrito en la norma VDI 2080, que consiste en dividir la sección en áreas iguales y ubicar los puntos de medición en sus centros. Si el flujo es uniforme, bastan pocas mediciones; en caso contrario, se requiere un mayor número de puntos hasta que cada valor represente de forma confiable a su entorno inmediata (ElettronicaVeneta).

El túnel de viento modelo WIND-TU2/EV cuenta ya con secciones divididas, habiendo un total de 225 puntos para realizar las mediciones.

Figura 31

Puntos de medición para la estimación del caudal



Nota. Elaboración propia.

En la Figura 31, se muestra la distribución de los 225 puntos utilizados para medir velocidades en la sección de prueba del túnel de viento. Esta disposición permitió estimar el caudal total de aire con alta precisión, siguiendo el método de integración por áreas.

Figura 32

Anemómetro portátil UNI-T



Nota. Elaboración propia.

La Figura 32, muestra el instrumento utilizado para medir la velocidad del viento en la cámara de pruebas. Asegura que las condiciones del flujo sean precisas y repetibles.

Tabla 16

Velocidades registradas en 225 puntos de medición de caudal a 3 m/s

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2.7	3.4	3.0	2.9	2.9	2.9	3.1	2.9	2.9	2.7	2.7	2.9	2.6	2.4	2.6
2	3.0	2.9	3.1	3.1	3.5	3.6	3.7	3.8	3.4	3.1	3.2	2.9	2.9	3.1	2.6
3	3.0	3.1	3.2	3.4	3.9	3.5	3.7	3.4	3.4	3.2	3.2	3.0	3.2	3.4	2.9
4	3.2	2.9	3.2	3.6	3.0	2.8	2.9	3.2	3.4	3.1	3.6	3.4	3.1	3.2	2.6
5	2.8	3.5	3.4	3.4	3.1	2.9	2.6	2.5	2.7	2.9	3.4	3.5	3.2	3.1	2.2
6	3.1	3.6	3.7	3.1	3.4	3.0	2.3	2.2	2.4	2.6	3.4	3.5	3.4	3.5	2.7
7	3.2	3.8	3.5	3.0	2.7	2.3	1.9	1.7	2.3	2.4	2.5	3.2	3.2	3.4	3.2
8	3.4	3.8	3.5	2.7	2.6	2.2	1.9	1.7	2.2	2.6	2.7	3.5	3.4	3.2	2.6
9	3.8	3.8	3.2	2.6	2.6	2.2	1.7	1.7	2.2	2.6	2.7	3.5	3.4	3.2	2.6
10	3.8	3.8	3.2	2.6	2.8	2.4	1.9	2.0	2.7	2.6	2.8	3.5	3.2	3.8	3.1
11	3.7	3.5	2.8	2.6	2.5	2.5	2.2	2.3	3.1	2.5	2.9	3.4	3.2	3.7	3.0
12	3.2	3.2	2.8	2.9	2.8	2.9	2.7	2.6	3.4	3.9	3.2	3.6	3.4	3.4	2.9
13	3.4	3.8	3.0	3.0	3.2	3.4	3.4	3.4	3.6	3.5	3.4	3.4	4.0	4.2	3.1
14	3.4	3.9	2.8	2.8	3.9	3.7	3.8	3.8	3.9	3.7	3.5	3.8	3.2	4.1	3.7
15	3.5	3.4	3.2	2.8	3.2	3.4	3.2	3.4	3.8	3.7	3.8	3.7	3.7	3.8	3.4

Nota. La Tabla 16, presenta las velocidades registradas en 225 puntos de medición, obteniéndose una velocidad media aproximada de 3.1 m/s, la cual se utiliza en la ecuación (9) para el análisis del caudal.

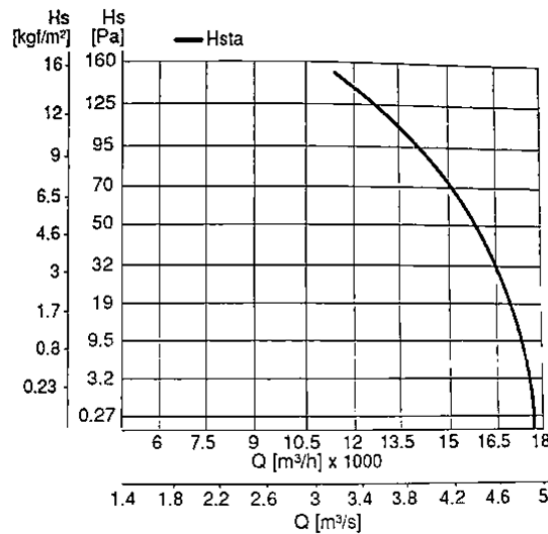
$$\dot{V} = 0.5625 \text{ m}^2 * 3.1 \text{ m/s} * 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}$$

$$\dot{V} = 6277.5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

El caudal del aire a una velocidad de 3 m/s es de 6277.5 m³/h.

Figura 33

Curva de presión-caudal



Nota. Distribución de puntos de medición para estimar el caudal según norma VDI 2080. Adaptado de *Entrenador aerogenerador con túnel de viento: Manual teórico y de funcionamiento* (pp. 60–62), por ElettronicaVeneta, (s. f.).

El eje X representa el caudal volumétrico (Q), dado en dos unidades:

- m³/h × 1000 (parte superior del eje X)
- m³/s (parte inferior del eje X)

El eje Y representa la presión estática (Hs):

- En Pa (Pascuales) a la derecha
- En kgf/m² a la izquierda (unidad menos común actualmente)

Tabla 17*Velocidades registradas en 225 puntos de medición de caudal a 4 m/s*

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	3.6	4.5	4.0	3.8	3.8	3.9	4.2	3.8	3.9	3.6	3.6	3.8	3.4	3.2	3.4
2	4.0	3.8	4.2	4.2	4.6	4.8	4.9	5.0	4.5	4.2	4.2	3.9	3.9	4.2	3.5
3	4.0	4.2	4.3	4.6	5.2	4.6	4.9	4.6	4.6	4.3	4.2	4.0	4.3	4.5	3.8
4	4.2	3.9	4.3	4.8	4.0	3.7	3.9	4.2	4.6	4.2	4.8	4.5	4.2	4.2	3.5
5	3.7	4.6	4.6	4.5	4.2	3.8	3.5	3.4	3.6	3.8	4.5	4.6	4.3	4.2	3.0
6	4.2	4.8	4.9	4.2	4.5	4.0	3.0	2.9	3.2	3.2	3.8	4.5	4.6	4.6	3.6
7	4.3	5.0	4.6	4.0	3.6	3.1	2.6	2.3	2.9	3.0	3.4	4.2	4.3	4.5	4.2
8	4.5	4.9	4.5	3.6	3.4	3.0	2.3	2.2	2.9	3.5	3.6	4.6	4.6	4.2	3.4
9	5.1	5.0	4.3	3.5	3.7	3.2	2.6	2.7	3.6	3.4	3.7	4.6	4.3	5.1	4.1
10	4.9	4.6	3.7	3.4	3.4	3.4	3.0	3.1	4.2	3.4	3.9	4.6	4.3	4.9	4.0
11	4.3	4.3	3.7	3.9	3.7	3.8	3.6	3.5	4.5	5.2	4.3	4.8	4.5	4.6	3.9
12	4.5	5.1	4.0	4.0	4.2	4.5	4.5	4.5	4.8	4.6	4.5	4.5	5.4	5.6	4.2
13	4.6	5.2	3.7	3.7	5.2	4.9	5.1	5.0	5.2	4.9	4.6	5.1	4.3	5.4	4.9
14	4.6	4.6	4.2	3.7	4.3	4.6	4.2	4.5	5.0	4.9	5.1	4.9	4.9	5.0	4.6
15	3.6	4.0	4.3	4.8	4.3	4.9	4.6	4.6	4.3	4.2	4.9	5.1	4.8	4.8	3.8

Nota. La Tabla 17, muestra las velocidades registradas en 225 puntos de medición, obteniéndose una velocidad media de 4.2 m/s, con un caudal calculado de 8447.67 m³/h.

Tabla 18*Velocidades registradas en 225 puntos de medición de caudal a 5 m/s*

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	4.5	5.6	5	4.8	4.8	4.9	5.2	4.8	4.9	4.5	4.5	4.8	4.3	4	4.3
2	5	4.8	5.2	5.2	5.8	6	6.1	6.3	5.6	5.2	5.3	4.9	4.9	5.2	4.4
3	5	5.2	5.4	5.7	6.5	5.8	6.1	5.7	5.7	5.4	5.3	5	5.4	5.6	4.8
4	5.3	4.9	5.4	6	5	4.6	4.9	5.3	5.7	5.2	6	5.6	5.2	5.3	4.4
5	4.6	5.8	5.7	5.6	5.2	4.8	4.4	4.2	4.5	4.8	5.6	5.8	5.4	5.2	3.7
6	5.2	6	6.1	5.2	5.6	5	3.8	3.6	4	4	4.8	5.6	5.7	5.8	4.5
7	5.4	6.3	5.8	5	4.5	3.9	3.2	2.9	3.6	3.8	4.2	5.3	5.4	5.6	5.3
8	5.6	6.1	5.6	4.5	4.3	3.7	2.9	2.8	3.6	4.4	4.5	5.8	5.7	5.3	4.3
9	6.4	6.3	5.4	4.4	4.6	4	3.2	3.4	4.5	4.3	4.6	5.8	5.4	6.4	5.09
10	6.1	5.8	4.6	4.3	4.2	4.2	3.7	3.9	5.2	4.2	4.9	5.7	5.4	6.1	5
11	5.4	5.4	4.6	4.9	4.6	4.8	4.5	4.4	5.6	6.5	5.4	6	5.6	5.7	4.9
12	5.6	6.4	5	5	5.3	5.6	5.6	5.6	6	5.8	5.6	5.6	6.7	7	5.2
13	5.7	6.5	4.6	4.6	6.5	6.1	6.4	6.3	6.5	6.1	5.8	6.4	5.4	6.8	6.1
14	5.8	5.7	5.3	4.6	5.4	5.7	5.3	5.6	6.3	6.1	6.4	6.1	6.1	6.3	5.7
15	4.5	5	5.4	6	5.4	6.1	5.8	5.8	5.4	5.3	6.1	6.4	6	6	4.8

Nota. La Tabla 18, muestra una velocidad media de 5.2 m/s y un caudal de aire de 10 559.61 m³/h.

Tabla 19

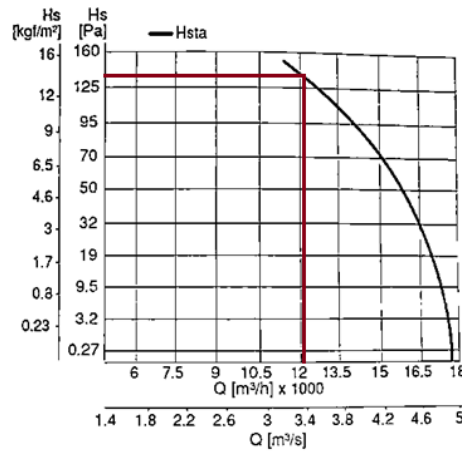
Velocidades registradas en 225 puntos de medición de caudal a 6 m/s

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	5.4	6.4	6.3	6.3	6.5	6.5	6.1	5.8	6.1	5.8	6.1	5.8	5.3	5.8	5.7
2	5.2	6.1	6.4	6.4	6	6.5	6.5	7	6.7	6.1	6.7	6.4	6	6.1	5.8
3	5.3	6	6.3	6	6.4	6.1	6.8	6.3	6	6.3	6.4	5.7	6.1	5.8	5.2
4	3.9	6.5	6.8	6.3	5.7	5.8	5.8	5.3	5.8	6	5.8	6.3	5.8	5.8	5.2
5	5	7	7.5	6	5.4	6.1	5.7	4.9	5	6.1	5.4	6.4	6.3	6.1	6
6	5.8	6.8	7.1	5.8	5.2	6.3	4.2	4.5	4.9	4.8	5.3	5.7	6	5.8	5.6
7	6.3	6.7	6.5	5.8	4.8	4.9	3.9	3.8	3.8	4.8	5.2	6	6	6.4	6
8	6.1	6.4	6.3	5.4	5.2	4.5	3.9	3.9	3.9	4.4	5.4	6.3	6	6.8	6.4
9	6.7	6.1	5.8	5.2	5.4	4.4	3.7	3.9	4.3	4.9	5.2	6	6.1	6.3	6.1
10	6	5.7	5.2	5.3	5.3	4.2	4.6	4.6	4.9	5.3	5.7	7	6.3	6.4	5.8
11	6.1	6.5	5.4	5	5	5.4	5.6	5.2	5.3	5.6	6.1	7.2	7.5	7	6.1
12	7	5.8	6.1	5.4	6.4	6.1	6.4	6.1	6	6.7	6.3	6.8	7.5	7	6
13	6.5	6.4	6.5	5.3	7.1	6.4	7.2	7.8	6.7	7.5	7.5	7.7	7.7	7.4	6.4
14	6.8	5.6	5.8	5.8	7.2	6.1	7.1	5.9	7	7	6.8	7.4	6.8	7.2	6.3
15	5.6	5.3	5.8	6.4	6	7	6.4	6.7	7.1	7.1	7.2	6.8	6.5	6.3	6

Nota. La Tabla 19, muestra una velocidad media de 6 m/s y un caudal de 12 077.67 m³/h.

Figura 34

Curva de presión-caudal a 6 m/s



Nota. Adaptado de *Entrenador aerogenerador con túnel de viento: Manual teórico y de funcionamiento* (pp. 60–62), por Elettronica Veneta, (s. f.).

La Figura 34, muestra el comportamiento del caudal en función de la presión diferencial para una velocidad del viento de 6 m/s. El equipo está diseñado para trabajar eficientemente hasta un caudal de aproximadamente 12,000 m³/h, donde mantiene la presión máxima.

Tabla 20

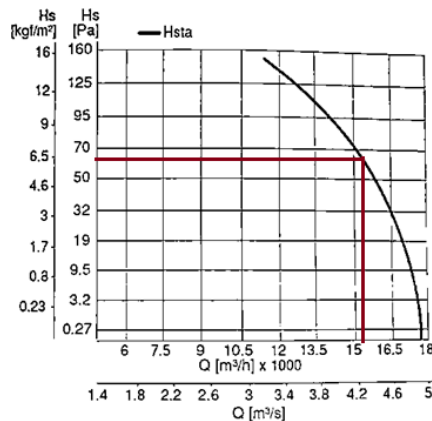
Velocidades registradas en 225 puntos de medición de caudal a 7 m/s

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	7.1	7.5	7.4	7.4	7.1	7.4	7.6	7.5	7.3	7.2	7.1	7	6.9	6.8	6.7
2	7	7.4	7.2	7.5	7.3	7.3	7.2	7.1	6.9	6.8	6.7	6.6	6.5	6.5	6.4
3	7.7	7.9	7.7	7.4	7.4	7.2	7.1	7	6.9	6.8	6.6	6.6	6.5	6.4	6.4
4	8.1	7.7	8.3	7.9	7.6	7.4	7.3	7.2	7	6.9	6.9	6.8	6.8	6.8	7.1
5	7.5	8.6	8.1	7.5	7.3	7.1	7	7	7.1	7.2	7.3	7.5	7.7	8	8.2
6	7.7	9	8.2	7.6	7.4	7.3	7.2	7.3	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	8	7.8
7	8.5	8.5	9.2	7.7	7.6	7.6	7.5	7.5	7.4	7.4	7.5	7.7	7.9	8	8.1
8	8.3	9.5	7.7	7.4	6.8	6.9	7	7.2	7.3	7.3	7.4	7.5	7.6	7.6	7.4
9	9.2	8.9	7.9	6.5	6.5	6.7	6.9	7.1	7.3	7.4	7.6	7.7	7.9	8	8.5
10	9	8.5	7.7	6.5	6.6	6.9	7.2	7.4	7.5	7.5	7.2	7.4	7.6	7.9	7.2
11	8.6	8.1	7.4	6.4	6.5	6.9	7.3	7.6	7.7	7.8	7.9	8	8.1	8.2	8.2
12	9	8.5	7.2	7.2	7.5	7.6	7.6	7.6	7.5	7.4	7.3	7.3	7.2	7.3	7.2
13	7.5	8.1	7.4	8.3	7.9	7.8	7.6	7.5	7.4	7.4	7.5	7.6	7.8	7.9	7.9
14	7.9	8.6	7.5	8.2	8	7.4	7.4	7.7	7.8	7.9	8	8	8	7.9	7.7
15	7.2	8.3	7.1	7.9	7.8	7.4	7.7	7.2	7.2	7.8	7.9	8.2	8.3	8.1	8.2

Nota. La Tabla 20, muestra una velocidad media de 7.5 m/s y un caudal de 15 228.9 m³/h.

Figura 35

Curva de presión-caudal a 7 m/s



Nota. Adaptado de *Entrenador aerogenerador con túnel de viento: Manual teórico y de funcionamiento* (pp. 60–62), por ElettronicaVeneta, (s. f.).

La Figura 35, muestra la curva característica de presión estática (Hs) en función del caudal volumétrico (Q) a una velocidad media de 7.5 m/s. La línea negra representa la curva típica del sistema de ventilación, mientras que la línea roja muestra el punto de operación del túnel de viento con un caudal de 15 228.9 m³/h.

Tabla 21

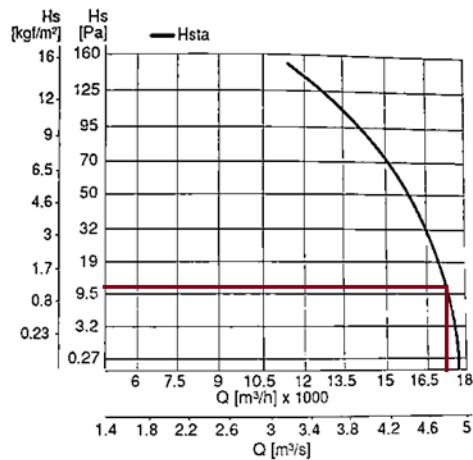
Velocidades registradas en 225 puntos de medición de caudal a 8 m/s

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	8.1	8.6	8.5	8.5	8.1	8.5	8.7	8.6	8.4	8.2	8.1	8	7.9	7.8	7.7
2	8	8.5	8.2	8.6	8.3	8.3	8.2	8.1	7.9	7.8	7.7	7.5	7.4	7.4	7.3
3	8.8	9	8.8	8.5	8.5	8.2	8.1	8	7.9	7.8	7.5	7.5	7.4	7.3	7.3
4	9.2	8.8	9.5	9	8.7	8.5	8.3	8.2	8	7.9	7.9	7.8	7.8	7.8	8.1
5	8.6	9.8	9.3	8.6	8.3	8.1	8	8	8.1	8.3	8.3	8.6	8.8	9.1	9.4
6	8.8	10.3	9.4	8.7	8.5	8.3	8.2	8.3	8.6	8.7	8.8	8.9	9	9.1	8.9
7	9.7	9.7	10.5	8.8	8.7	8.7	8.6	8.6	8.5	8.5	8.6	8.8	9	9.1	9.3
8	9.5	10.9	8.8	8.5	7.8	7.9	8	8.2	8.3	8.3	8.5	8.6	8.7	8.7	8.5
9	10.5	10.2	9	7.4	7.4	7.6	7.9	8.1	8.3	8.5	8.7	8.8	9	9.1	9.7
10	10.3	9.7	8.8	7.4	7.5	7.9	8.2	8.5	8.6	8.6	8.2	8.5	8.7	9	8.2
11	9.8	9.3	8.5	7.3	7.5	7.9	8.3	8.7	8.8	8.9	9	9.1	9.2	9.3	9.3
12	10.3	9.7	8.2	8.2	8.6	8.7	8.7	8.7	8.6	8.5	8.3	8.3	8.2	8.3	8.2
13	8.6	9.3	8.5	9.5	9	8.9	8.7	8.6	8.5	8.5	8.6	8.7	9	9.1	9.1
14	9	9.8	8.6	9.4	9.1	8.5	8.5	8.8	8.9	9	9.1	9.1	9.1	9	8.8
15	8.2	9.5	8.1	9	8.9	8.5	8.8	8.2	8.2	8.9	9.1	9.4	9.5	9.3	9.4

Nota. La Tabla 21, muestra una velocidad media de 8.5 m/s y un caudal de 17406.9 m³/h.

Figura 36

Curva de presión-caudal a 8 m/s



Nota. Adaptado de *Entrenador aerogenerador con túnel de viento: Manual teórico y de funcionamiento* (pp. 60–62), por Eleetronica Veneta, (s. f.).

En la Figura 36, las líneas rojas marcan el punto de operación real: un caudal de 17 406.9 m³/h (aproximadamente 4.84 m³/s) y una presión estática de 9.5 Pa. Este punto de intersección señala

el equilibrio entre la demanda de caudal del túnel y la capacidad del sistema, y permite analizar el rendimiento aerodinámico bajo condiciones estables de 8 m/s.

Tabla 22

Velocidades registradas en 225 puntos de medición de caudal a 9 m/s

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	9.1	9.6	9.5	9.5	9.1	9.5	9.8	9.6	9.4	9.3	9.1	9	8.9	8.7	8.6
2	9	9.5	9.3	9.6	9.4	9.4	9.3	9.1	8.9	8.7	8.6	8.5	8.4	8.4	8.2
3	9.9	10.1	9.9	9.5	9.5	9.3	9.1	9	8.9	8.7	8.5	8.5	8.4	8.2	8.2
4	10.4	9.9	10.6	10.3	9.8	9.5	9.4	9.2	9	8.9	8.9	8.7	8.7	8.7	9.1
5	9.6	11.1	10.4	9.6	9.4	9.1	9	9	9.1	9.3	9.4	9.6	9.9	10.3	10.5
6	9.9	11.6	10.5	9.8	9.5	9.4	9.2	9.4	9.6	9.8	9.9	10	10.1	10.3	10
7	11	11	11.8	9.9	9.8	9.8	9.6	9.6	9.5	9.5	9.6	9.9	10.1	10.3	10.4
8	10.7	12.2	9.9	9.5	8.7	8.9	9	9.2	9.4	9.4	9.6	9.6	9.8	9.8	9.5
9	11.8	11.5	10.2	8.4	8.4	8.6	8.9	9.1	9.4	9.5	9.8	9.9	10.1	10.3	10.9
10	11.6	11	9.9	8.4	8.5	8.9	9.3	9.5	9.6	9.6	9.3	9.6	9.8	10.3	9.3
11	11	10.6	9.5	8.3	8.4	8.9	9.4	9.8	9.9	10	10.1	10.3	10.4	10.6	10.6
12	11.6	11	9.3	9.3	9.6	9.8	9.8	9.8	9.6	9.5	9.4	9.4	9.3	9.4	9.3
13	9.6	10.6	9.5	10.6	10.3	10.1	9.9	9.8	9.6	9.6	9.8	9.9	10.1	10.3	10.3
14	10.2	11.1	9.6	10.6	10.3	9.8	9.8	10.1	10.3	10.4	10.6	10.6	10.6	10.3	10.1
15	9.3	10.7	9.2	10.2	10	9.8	10	9.3	9.3	10	10.2	10.6	10.7	10.5	10.6

Nota. La Tabla 22, muestra una velocidad media de 9.7 m/s y un caudal de 19630.8 m³/h.

Tabla 23

Velocidades registradas en 225 puntos de medición de caudal a 10 m/s

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	10.2	10.7	10.6	10.6	10.2	10.6	10.9	10.7	10.5	10.3	10.2	10	9.9	9.7	9.6
2	10	10.6	10.3	10.7	10.4	10.4	10.3	10.2	9.9	9.7	9.6	9.4	9.3	9.3	9.1
3	11	11.3	11	10.6	10.6	10.3	10.1	10	9.9	9.7	9.4	9.4	9.3	9.1	9.1
4	11.6	11	11.9	11.3	10.9	10.6	10.4	10.3	10	9.9	9.9	9.7	9.7	9.7	10.2
5	10.7	12.2	11.5	10.7	10.4	10.1	10	10	10.1	10.3	10.4	10.7	11	11.4	11.7
6	11	13	11.6	10.9	10.6	10.4	10.3	10.4	10.7	10.9	11	11.1	11.3	11.4	11.1
7	12.1	12.1	13.2	10.9	10.7	10.7	10.6	10.6	10.5	10.5	10.6	10.9	11.3	11.4	11.6
8	11.9	13.6	11	10.6	9.7	9.9	10	10.3	10.4	10.4	10.6	10.7	10.9	10.9	10.6
9	13.2	12.7	11.2	9.3	9.3	9.6	9.9	10.1	10.4	10.6	10.9	11	11.3	11.4	12.1
10	12.9	12.2	11	9.3	9.4	9.9	10.2	10.6	10.7	10.7	10.3	10.6	10.9	11.3	10.3
11	12.1	11.6	10.7	9.1	9.3	9.9	10.4	10.9	11	11.1	11.3	11.4	11.6	11.7	11.7
12	12.9	12.2	10.3	10.3	10.7	10.9	10.9	10.9	10.7	10.6	10.4	10.4	10.3	10.4	10.3
13	10.7	11.6	10.6	11.9	11.3	11.1	10.9	10.7	10.6	10.6	10.7	10.9	11.1	11.3	11.3
14	11.3	12.2	10.7	11.8	11.4	10.6	10.6	11	11.2	11.3	11.4	11.4	11.4	11.3	11
15	10.3	11.9	10.1	11.3	11.1	10.6	11	10.3	10.3	11.1	11.4	11.7	11.9	11.6	11.7

Nota. La Tabla 23, muestra una velocidad media de 10.7 m/s y un caudal de 21756.6 m³/h.

Tabla 24*Velocidades registradas en 225 puntos de medición de caudal a 11 m/s*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	11.2	11.8	11.6	11.6	11.2	11.6	11.9	11.8	11.5	11.3	11.2	11	10.8	10.7	10.5
2	11	11.6	11.3	11.8	11.5	11.5	11.3	11.2	10.8	10.7	10.5	10.4	10.2	10.2	10.1
3	12.1	12.4	12.1	11.6	11.6	11.3	11.2	11	10.8	10.7	10.4	10.4	10.2	10.1	10.1
4	12.7	12.1	12.9	12.4	11.9	11.6	11.5	11.3	11	10.8	10.8	10.7	10.7	10.7	11.2
5	11.8	13.5	12.9	11.8	11.5	11.2	11	11	11.2	11.3	11.5	11.8	12.1	12.6	12.9
6	12.1	14.1	12.9	12.1	11.6	11.5	11.3	11.5	11.8	11.9	12.1	12.3	12.4	12.6	12.3
7	13.4	13.4	14.5	12.1	11.9	11.9	11.8	11.8	11.6	11.6	11.8	12.1	12.4	12.6	12.7
8	13.1	15	12.1	11.6	10.7	10.8	11	11.3	11.5	11.5	11.6	11.8	12	12	11.6
9	14.5	14	12.4	10.2	10.2	10.5	10.8	11.2	11.5	11.6	12	12.1	12.4	12.6	13.4
10	14.2	13.4	12.1	10.2	10.4	10.8	11.3	11.6	11.8	11.8	11.3	11.6	12	12.4	11.2
11	13.5	12.7	11.6	10	10.2	10.8	11.5	12	12.1	12.3	12.4	12.6	12.7	12.9	12.9
12	14.1	13.4	11.3	11.3	11.8	12	12	12	11.8	11.6	11.5	11.5	11.3	11.5	11.3
13	11.8	12.7	11.6	12.9	12.4	12.3	12	11.8	11.6	11.6	11.8	12	12.3	12.4	12.4
14	12.4	13.5	11.8	12.8	12.6	11.6	11.6	12.1	12.3	12.4	12.6	12.6	12.6	12.4	12.1
15	11.3	13.1	11.5	12.4	12.3	11.6	12.1	11.3	11.3	12.3	12.6	13	13.1	12.9	13

Nota. La Tabla 24, muestra una velocidad media de 11.8 m/s y un caudal de 23947.2 m³/h.

Tabla 25*Velocidades registradas en 225 puntos de medición de caudal a 12 m/s*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	12.2	12.9	12.7	12.7	12.2	12.7	13.1	12.9	12.6	12.3	12.2	12	11.8	11.7	11.5
2	12	12.7	12.3	12.9	12.6	12.6	12.3	12.2	11.8	11.7	11.5	11.3	11.1	11.1	11
3	13.2	13.5	13.2	12.7	12.7	12.3	12.2	12	11.8	11.7	11.3	11.3	11.1	11	11
4	13.9	13.2	14.2	13.5	12.9	12.7	12.5	12.3	12	11.8	11.8	11.7	11.7	11.7	12.2
5	12.9	14.7	13.9	12.9	12.6	12.2	12	12	12.2	12.3	12.6	12.9	13.2	13.7	14.1
6	13.2	15.4	13.9	13.2	12.7	12.6	12.3	12.6	12.9	13.1	13.2	13.4	13.5	13.7	13.4
7	14.6	14.6	15.8	13.2	12.9	12.9	12.7	12.7	12.6	12.6	12.7	13.2	13.5	13.7	13.9
8	14.3	16.3	13.2	12.7	11.7	11.8	12	12.3	12.6	12.6	12.7	12.9	13.1	13.1	12.7
9	15.9	15.4	13.5	11.1	11.1	11.5	11.8	12.2	12.6	12.7	13.1	13.2	13.5	13.7	14.6
10	15.4	14.6	13.2	11.1	11.3	11.8	12.3	12.7	12.9	12.9	12.3	12.7	13.1	13.5	12.2
11	14.6	13.9	12.7	10.9	11.1	11.8	12.6	13.1	13.2	13.4	13.5	13.7	13.9	14	14
12	15.4	14.6	12.3	12.3	12.9	13.1	13.1	13.1	12.9	12.7	12.6	12.6	12.3	12.6	12.3
13	12.9	13.9	12.7	14.2	13.5	13.4	13.1	12.9	12.7	12.7	12.9	13.1	13.4	13.5	13.5
14	13.5	14.7	12.9	14.1	13.8	12.6	12.6	13.2	13.4	13.5	13.7	13.7	13.7	13.5	13.2
15	12.3	14.3	12.6	14.1	13.8	12.6	13.2	12.3	12.3	13.4	13.7	14.1	14.2	14	14.2

Nota. La Tabla 25, muestra una velocidad media de 12.9 m/s y un caudal de 26129.7 m³/h.

Cálculo de la eficiencia eléctrica

La eficiencia eléctrica fue calculada utilizando los datos experimentales de tensión y corriente obtenidos en el túnel de viento, considerando la fórmula (3):

$$\eta_e = \frac{P_{el\acute{e}ctrica}}{P_{e\acute{o}lica}}$$

Donde:

$P_{el\acute{e}ctrica}$: $V * I$; V es la tensión eléctrica, I es la corriente.

Y la potencia eólica se calcula usando la fórmula (1):

$$P_{e\acute{o}lica} = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3$$

Dónde:

$P_{e\acute{o}lica}$: Potencia generada (en vatios)

ρ : Densidad del aire (en kg/m^3)

A : Área barrida por las palas del aerogenerador (en m^2) representa el área barrida por las palas, y esta no depende del número de palas del aerogenerador.

v^3 : Velocidad del viento (en m/s)

Materiales o equipos usados para el cálculo de la eficiencia eléctrica

a) Aerogenerador

Para esta investigación, se opta por un aerogenerador tripala de eje horizontal el cual se observa en la figura 37, sus características se muestran en la tabla 26.

Figura 37

Aerogenerador de eje horizontal tripala



Nota. Elaboración propia.

La Figura 37, muestra el aerogenerador HK-300S utilizado en los ensayos.

Tabla 26

Características del aerogenerador

Aerogenerador HK-300S	
N.º de serie (S/N)	201709018871
Potencia nominal	300 W
Número de palas	3
Modelo	HK - 300 S
Voltaje nominal	12 V
Peso neto	6.5 kg

Nota. Características técnicas del aerogenerador HK-300S utilizado en los ensayos experimentales. La información corresponde a especificaciones del fabricante. Elaboración propia.

b) Pinza amperimétrica

La pinza amperimétrica UNI-T UT211B se utilizó para medir la corriente (A) eléctrica generada por el aerogenerador, sin necesidad de interrumpir el circuito.

Figura 38

Pinza amperimétrica UNI T UT211B



Nota. Elaboración propia.

La Figura 38, muestra el dispositivo usado para medir la corriente generada por el aerogenerador sin interrumpir el circuito.

c) Multímetro digital

El multímetro digital UNI-T UT33A+ se empleó para medir tensión (V).

Figura 39

Multímetro digital UNI T UT33A+



Nota. Elaboración propia.

La Figura 39, muestra la herramienta utilizada para registrar la tensión eléctrica. Su lectura, junto con la corriente, permite calcular la potencia generada.

d) Inversor

El inversor serie DY-8102 (150 W) fue utilizado para convertir la corriente continua generada por el aerogenerador en corriente alterna.

Especificaciones técnicas:

- Potencia nominal de salida : 150 W
- Tensión de entrada DC : 12 V
- Tensión de salida AC : 220 V \pm 10 %
- Frecuencia de salida : 50 Hz
- Eficiencia de conversión : \sim 85–90 %

Figura 40

Inversor serie DY-8102 (150 W)



Nota. Elaboración propia.

La Figura 40, muestra el inversor que se utilizó para convertir la corriente continua generada por el aerogenerador en corriente alterna. Su uso permitió evaluar el comportamiento eléctrico en condiciones reales de carga.

e) Controlador

El controlador Victron MPPT 75|15 se utilizó para optimizar la transferencia de energía desde el aerogenerador hacia la batería, ajustando continuamente el punto de máxima potencia (MPPT) y mejorando la eficiencia del sistema.

Especificaciones técnicas:

- Tensión de entrada máxima : 75 V
- Corriente de carga máxima : 15 A
- Tensión de batería compatible : 12 V o 24 V
- Eficiencia de conversión: hasta 98 %

Figura 41

Controlador Victron MPPT 75|15



Nota. Elaboración propia.

Figura 42

Equipo de pruebas para evaluación de perfiles aerodinámicos NACA



Nota. Túnel de viento utilizado para analizar el rendimiento eléctrico de doce perfiles aerodinámicos NACA impresos en 3D bajo condiciones de viento controlado, compuesto por generador HK-300S y tablero de medición.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Resultados del análisis aerodinámico con QBlade

4.1.1 Eficiencia aerodinámica perfil NACA 0006

Tabla 27

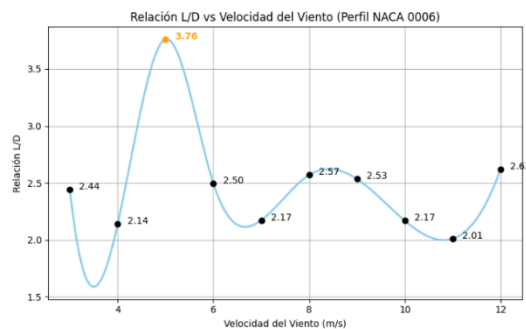
Cálculo de L/D NACA 0006

Velocidad del viento (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Área (m ²)	Cl	Cd	L	D	L/D
3	0.797	0.020	0.743	0.304	0.052	0.021	2.444
4			0.785	0.367	0.097	0.045	2.139
5			0.376	0.1	0.073	0.019	3.760
6			0.741	0.297	0.207	0.083	2.495
7			0.754	0.347	0.286	0.132	2.173
8			0.74	0.288	0.367	0.143	2.569
9			0.74	0.292	0.464	0.183	2.534
10			0.761	0.351	0.589	0.272	2.168
11			0.529	0.263	0.496	0.247	2.011
12			0.742	0.283	0.828	0.316	2.622

Nota: Área (m²) es el área de referencia (cuerda del perfil * envergadura), Cl y Cd son los coeficientes adimensionales de sustentación y arrastre obtenidos en QBlade, Cl indica la capacidad del perfil para generar sustentación y Cd su resistencia al flujo, L y D son las fuerzas dimensionales de sustentación y arrastre, respectivamente, L/D representa la eficiencia aerodinámica del perfil.

Figura 43

Relación sustentación - arrastre NACA 0006



Nota. Elaboración propia a partir de datos simulados.

La Figura 43, muestra que el perfil NACA 0006 alcanza su máxima eficiencia aerodinámica de 3.76 a 5 m/s. A menores velocidades, su eficiencia disminuye por la baja generación de

sustentación, y por encima de 6 m/s, esta también decae, lo que indica un rendimiento óptimo solo en vientos moderados.

4.1.2 Eficiencia aerodinámica perfil NACA 0008-34

Tabla 28

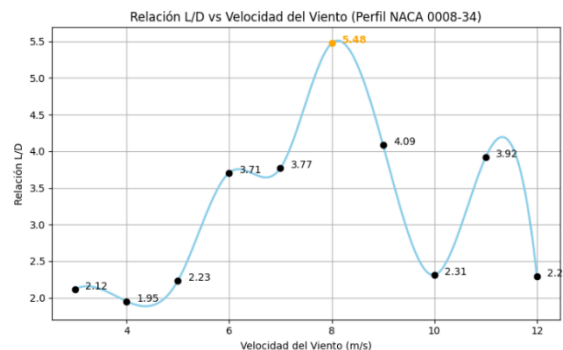
Cálculo de L/D NACA 0008-34

Velocidad del viento (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Área (m ²)	Cl	Cd	L	D	L/D
3	0.797	0.021	0.705	0.333	0.053	0.025	2.117
4			0.751	0.385	0.101	0.052	1.951
5			0.705	0.316	0.148	0.066	2.231
6			0.378	0.102	0.114	0.031	3.706
7			0.411	0.109	0.169	0.045	3.771
8			0.46	0.084	0.247	0.045	5.476
9			0.429	0.105	0.292	0.071	4.086
10			0.698	0.302	0.586	0.254	2.311
11			0.435	0.111	0.442	0.113	3.919
12			0.698	0.305	0.844	0.369	2.289

Nota: Área (m²) es el área de referencia (cuerda del perfil * envergadura), Cl y Cd son los coeficientes adimensionales de sustentación y arrastre obtenidos en QBlade, Cl indica la capacidad del perfil para generar sustentación y Cd su resistencia al flujo, L y D son las fuerzas dimensionales de sustentación y arrastre, respectivamente, L/D representa la eficiencia aerodinámica del perfil.

Figura 44

Relación sustentación - arrastre NACA 0008-34



Nota. Elaboración propia a partir de datos simulados.

La Figura 44, muestra que el perfil NACA 0008-34 presenta un pico abrupto de eficiencia a los 8 m/s, alcanzando un valor máximo de L/D de 5.48, lo que representa su mejor desempeño

aerodinámico. Fuera de ese rango, la eficiencia disminuye notablemente y muestra variaciones más irregulares.

4.1.3 Eficiencia aerodinámica perfil NACA 0024

Tabla 29

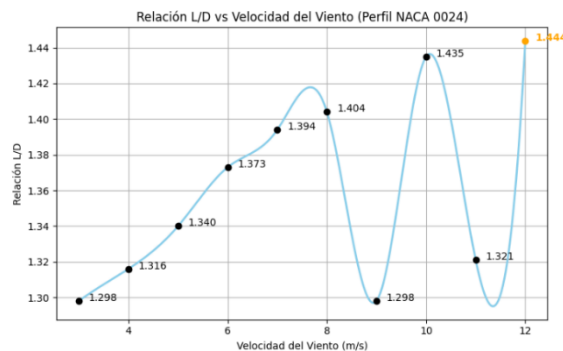
Cálculo de L/D NACA 0024

Velocidad del viento (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Área (m ²)	Cl	Cd	L	D	L/D
3	0.797	0.034	0.618	0.476	0.074	0.057	1.298
4			0.625	0.475	0.132	0.101	1.316
5			0.639	0.477	0.212	0.158	1.340
6			0.637	0.464	0.304	0.221	1.373
7			0.637	0.457	0.413	0.297	1.394
8			0.636	0.453	0.539	0.384	1.404
9			0.727	0.56	0.780	0.601	1.298
10			0.633	0.441	0.839	0.584	1.435
11			0.716	0.542	1.148	0.869	1.321
12			0.631	0.437	1.204	0.834	1.444

Nota: Área (m²) es el área de referencia (cuerda del perfil * envergadura), Cl y Cd son los coeficientes adimensionales de sustentación y arrastre obtenidos en QBlade, Cl indica la capacidad del perfil para generar sustentación y Cd su resistencia al flujo, L y D son las fuerzas dimensionales de sustentación y arrastre, respectivamente, L/D representa la eficiencia aerodinámica del perfil.

Figura 45

Relación sustentación - arrastre NACA 0024



Nota. Elaboración propia a partir de datos simulados.

La Figura 45, muestra una eficiencia aerodinámica baja y estable entre 3 y 8 m/s para el perfil NACA 0024, con valores de L/D en torno a 1.3-1.44. A partir de los 9 m/s, se observa una mayor

inestabilidad con picos y caídas pronunciadas, alcanzando su punto máximo a 12 m/s con un valor de L/D cercano a 1.45.

4.1.4 Eficiencia aerodinámica perfil NACA 4412

Tabla 30

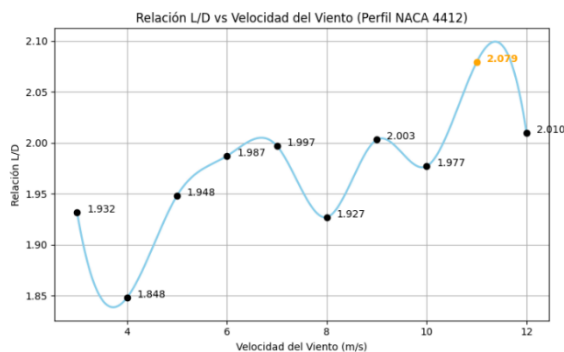
Cálculo de L/D NACA 4412

Velocidad del viento (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Área (m ²)	Cl	Cd	L	D	L/D
3			0.595	0.308	0.054	0.028	1.932
4			0.619	0.335	0.099	0.054	1.848
5			0.602	0.309	0.151	0.077	1.948
6			0.592	0.298	0.213	0.107	1.987
7			0.595	0.298	0.292	0.146	1.997
8	0.797	0.025	0.605	0.314	0.387	0.201	1.927
9			0.595	0.297	0.482	0.241	2.003
10			0.599	0.303	0.599	0.303	1.977
11			0.605	0.291	0.732	0.352	2.079
12			0.597	0.297	0.860	0.428	2.010

Nota: Área (m²) es el área de referencia (cuerda del perfil * envergadura), Cl y Cd son los coeficientes adimensionales de sustentación y arrastre obtenidos en QBlade, Cl indica la capacidad del perfil para generar sustentación y Cd su resistencia al flujo, L y D son las fuerzas dimensionales de sustentación y arrastre, respectivamente, L/D representa la eficiencia aerodinámica del perfil.

Figura 46

Relación sustentación - arrastre NACA 4412



Nota. Elaboración propia a partir de datos simulados.

La Figura 46, muestra un comportamiento estable con una tendencia general ascendente en L/D, alcanzando un máximo de a 2.079 a una velocidad de 11 m/s para el perfil. Aunque existen

pequeñas fluctuaciones a lo largo de las velocidades evaluadas, se observa una eficiencia consistente, lo que indica un buen desempeño aerodinámico en un amplio rango de velocidades.

4.1.5 Eficiencia aerodinámica perfil NACA 4424

Tabla 31

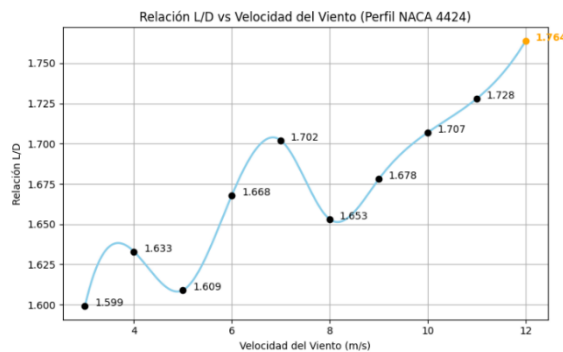
Cálculo de L/D NACA 4424

Velocidad del viento (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Área (m ²)	Cl	Cd	L	D	L/D
3	0.797	0.0315	0.614	0.384	0.069	0.043	1.599
4			0.619	0.379	0.123	0.075	1.633
5			0.758	0.471	0.235	0.146	1.609
6			0.632	0.379	0.283	0.170	1.668
7			0.652	0.383	0.397	0.233	1.702
8			0.767	0.464	0.610	0.369	1.653
9			0.656	0.391	0.660	0.394	1.678
10			0.647	0.379	0.804	0.471	1.707
11			0.653	0.378	0.982	0.568	1.728
12			0.665	0.377	1.190	0.675	1.764

Nota: Área (m²) es el área de referencia (cuerda del perfil * envergadura), Cl y Cd son los coeficientes adimensionales de sustentación y arrastre obtenidos en QBlade, Cl indica la capacidad del perfil para generar sustentación y Cd su resistencia al flujo, L y D son las fuerzas dimensionales de sustentación y arrastre, respectivamente, L/D representa la eficiencia aerodinámica del perfil.

Figura 47

Relación sustentación - arrastre NACA 4424



Nota. Elaboración propia a partir de datos simulados.

La Figura 47, muestra que para el perfil NACA 4424, la relación L/D se incrementa gradualmente conforme aumenta la velocidad del viento, alcanzando un valor máximo de 1.76

a 12 m/s. Si bien sus valores absolutos de eficiencia son inferiores a otros perfiles, su comportamiento progresivo y predecible lo hace adecuado para condiciones de viento estable.

4.1.6 Eficiencia aerodinámica perfil NACA 6412

Tabla 32

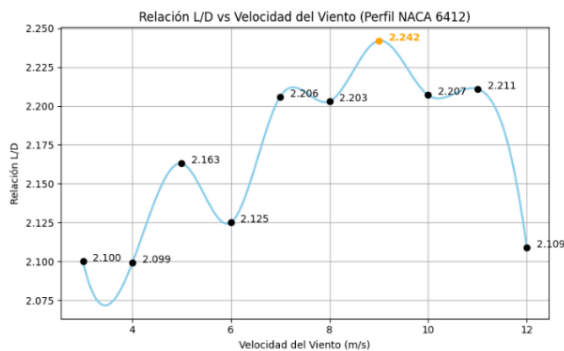
Cálculo de L/D NACA 6412

Velocidad del viento (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Área (m ²)	Cl	Cd	L	D	L/D
3	0.797	0.020	0.546	0.26	0.039	0.019	2.100
4			0.55	0.262	0.070	0.033	2.099
5			0.543	0.251	0.108	0.050	2.163
6			0.547	0.2574	0.157	0.074	2.125
7			0.545	0.247	0.213	0.097	2.206
8			0.542	0.246	0.277	0.126	2.203
9			0.547	0.244	0.354	0.158	2.242
10			0.543	0.246	0.433	0.196	2.207
11			0.544	0.246	0.525	0.238	2.211
12			0.561	0.266	0.645	0.306	2.109

Nota: Área (m²) es el área de referencia (cuerda del perfil * envergadura), Cl y Cd son los coeficientes adimensionales de sustentación y arrastre obtenidos en QBlade, Cl indica la capacidad del perfil para generar sustentación y Cd su resistencia al flujo, L y D son las fuerzas dimensionales de sustentación y arrastre, respectivamente, L/D representa la eficiencia aerodinámica del perfil.

Figura 48

Relación sustentación - arrastre NACA 6412



Nota. Elaboración propia a partir de datos simulados.

La Figura 48, muestra que para el perfil NACA 6412 se muestra un aumento constante de L/D hasta los 9 m/s, donde alcanza un máximo de aproximadamente 2.24. A partir de esta velocidad, la eficiencia disminuye.

4.1.7 Eficiencia aerodinámica perfil NACA 6H20

Tabla 33

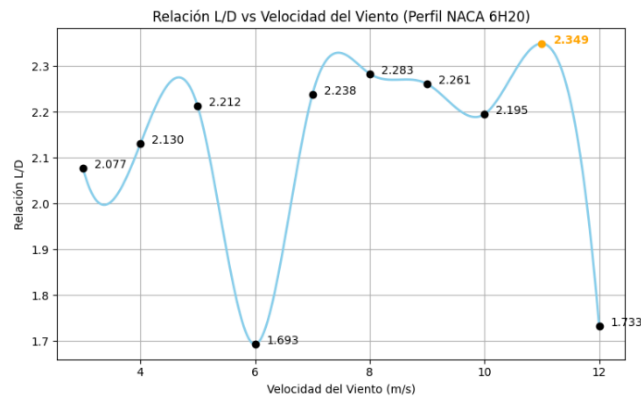
Cálculo de L/D NACA 6H20

Velocidad del viento (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Área (m ²)	Cl	Cd	L	D	L/D
3	0.797	0.01425	0.407	0.196	0.021	0.010	2.077
4			0.411	0.193	0.037	0.017	2.130
5			0.407	0.184	0.057	0.026	2.212
6			0.303	0.179	0.061	0.036	1.693
7			0.414	0.185	0.114	0.051	2.238
8			0.411	0.18	0.148	0.065	2.283
9			0.416	0.184	0.189	0.084	2.261
10			0.417	0.19	0.234	0.107	2.195
11			0.411	0.175	0.280	0.119	2.349
12			0.305	0.176	0.247	0.142	1.733

Nota: Área (m²) es el área de referencia (cuerda del perfil * envergadura), Cl y Cd son los coeficientes adimensionales de sustentación y arrastre obtenidos en QBlade, Cl indica la capacidad del perfil para generar sustentación y Cd su resistencia al flujo, L y D son las fuerzas dimensionales de sustentación y arrastre, respectivamente, L/D representa la eficiencia aerodinámica del perfil.

Figura 49

Relación sustentación - arrastre NACA 6H20



Nota. Elaboración propia a partir de datos simulados.

La Figura 49, muestra que el perfil NACA 6H20 mantiene una relación L/D estable en todo el rango de velocidades, con un descenso en torno a los 6 m/s y un pico máximo cercano a 2.4 a 11 m/s. Su rendimiento constante sugiere estabilidad aerodinámica, ideal para entornos con variabilidad de viento.

4.1.8 Eficiencia aerodinámica perfil NACA 16021

Tabla 34

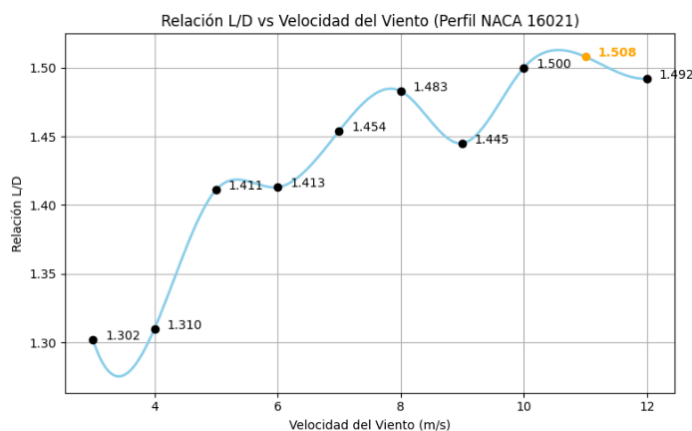
Cálculo de L/D NACA 16021

Velocidad del viento (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Área (m ²)	Cl	Cd	L	D	L/D
3	0.797	0.022	0.466	0.358	0.037	0.028	1.302
4			0.456	0.348	0.064	0.049	1.310
5			0.532	0.377	0.116	0.082	1.411
6			0.568	0.402	0.179	0.127	1.413
7			0.525	0.361	0.225	0.155	1.454
8			0.537	0.362	0.301	0.203	1.483
9			0.552	0.382	0.391	0.271	1.445
10			0.534	0.356	0.467	0.311	1.500
11			0.543	0.36	0.575	0.381	1.508
12			0.546	0.366	0.688	0.461	1.492

Nota: Área (m²) es el área de referencia (cuerda del perfil * envergadura), Cl y Cd son los coeficientes adimensionales de sustentación y arrastre obtenidos en QBlade, Cl indica la capacidad del perfil para generar sustentación y Cd su resistencia al flujo, L y D son las fuerzas dimensionales de sustentación y arrastre, respectivamente, L/D representa la eficiencia aerodinámica del perfil.

Figura 50

Relación sustentación - arrastre NACA 16021



Nota. Elaboración propia a partir de datos simulados.

La Figura 50, muestra que el perfil NACA 16021 presenta un comportamiento ascendente en L/D, con un máximo de 1.51 a 11 m/s. Su respuesta progresiva y sin grandes oscilaciones lo convierte en una opción estable para condiciones de flujo predecibles.

4.1.9 Eficiencia aerodinámica perfil NACA 66021

Tabla 35

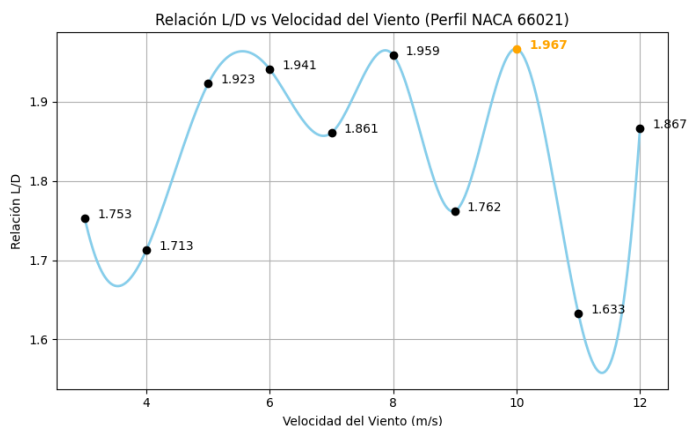
Cálculo de L/D NACA 66021

Velocidad del viento (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Área (m ²)	Cl	Cd	L	D	L/D
3	0.797	0.02	0.433	0.247	0.031	0.018	1.753
4			0.442	0.258	0.056	0.033	1.713
5			0.427	0.222	0.085	0.044	1.923
6			0.425	0.219	0.121	0.063	1.941
7			0.43	0.231	0.167	0.090	1.861
8			0.425	0.217	0.216	0.110	1.959
9			0.437	0.248	0.281	0.159	1.762
10			0.421	0.214	0.334	0.170	1.967
11			0.423	0.259	0.406	0.249	1.633
12			0.435	0.233	0.497	0.266	1.867

Nota: Área (m²) es el área de referencia (cuerda del perfil * envergadura), Cl y Cd son los coeficientes adimensionales de sustentación y arrastre obtenidos en QBlade, Cl indica la capacidad del perfil para generar sustentación y Cd su resistencia al flujo, L y D son las fuerzas dimensionales de sustentación y arrastre, respectivamente, L/D representa la eficiencia aerodinámica del perfil.

Figura 51

Relación sustentación - arrastre NACA 66021



Nota. Elaboración propia a partir de datos simulados.

La Figura 51, muestra una eficiencia aerodinámica moderada y estable para el perfil NACA 66021, con L/D entre 1.7 y 2.0. No presenta grandes picos ni caídas, lo que lo hace confiable en aplicaciones que requieren uniformidad.

4.1.10 Eficiencia aerodinámica perfil NACA 63(2)A-015

Tabla 36

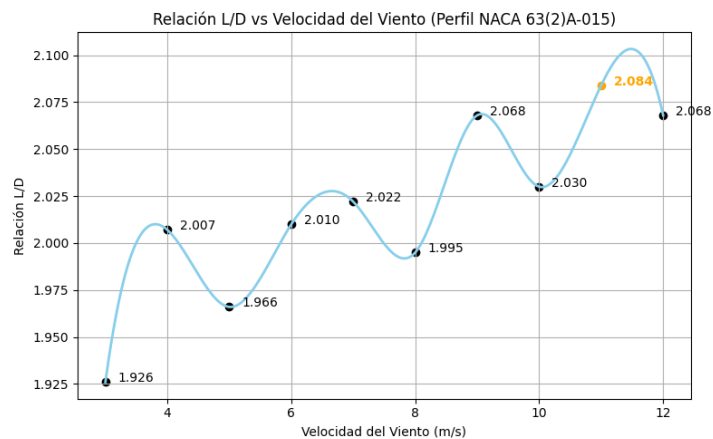
Cálculo de L/D NACA 63(2)A-015

Velocidad del viento (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Área (m ²)	Cl	Cd	L	D	L/D
3	0.797	0.022	0.809	0.42	0.063	0.033	1.926
4			0.809	0.403	0.112	0.056	2.007
5			0.816	0.415	0.176	0.089	1.966
6			0.814	0.405	0.252	0.126	2.010
7			0.817	0.404	0.345	0.171	2.022
8			0.822	0.412	0.453	0.227	1.995
9			0.819	0.396	0.572	0.276	2.068
10			0.822	0.405	0.708	0.349	2.030
11			0.821	0.394	0.856	0.411	2.084
12			0.823	0.398	1.021	0.494	2.068

Nota: Área (m²) es el área de referencia (cuerda del perfil * envergadura), Cl y Cd son los coeficientes adimensionales de sustentación y arrastre obtenidos en QBlade, Cl indica la capacidad del perfil para generar sustentación y Cd su resistencia al flujo, L y D son las fuerzas dimensionales de sustentación y arrastre, respectivamente, L/D representa la eficiencia aerodinámica del perfil.

Figura 52

Relación sustentación - arrastre NACA 63(2)A-015



Nota. Elaboración propia a partir de datos simulados.

La Figura 52, muestra un aumento constante de L/D con la velocidad del viento, alcanzando un valor máximo de 2.08 alrededor de los 11 m/s. Sus pequeñas oscilaciones no afectan significativamente su eficiencia general.

4.1.11 Eficiencia aerodinámica perfil NACA 11H09

Tabla 37

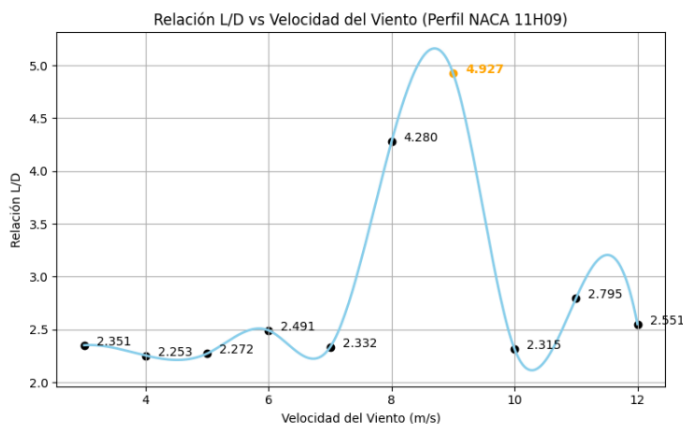
Cálculo de L/D NACA 11H09

Velocidad del viento (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Área (m ²)	Cl	Cd	L	D	L/D
3	0.797	0.03	0.818	0.348	0.073	0.031	2.351
4			0.863	0.383	0.137	0.061	2.253
5			0.861	0.379	0.213	0.094	2.272
6			0.812	0.326	0.290	0.116	2.491
7			0.842	0.361	0.409	0.175	2.332
8			0.642	0.15	0.407	0.095	4.280
9			0.606	0.123	0.486	0.099	4.927
10			0.757	0.327	0.750	0.324	2.315
11			0.819	0.293	0.982	0.351	2.795
12			0.755	0.296	1.077	0.422	2.551

Nota: Área (m²) es el área de referencia (cuerda del perfil * envergadura), Cl y Cd son los coeficientes adimensionales de sustentación y arrastre obtenidos en QBlade, Cl indica la capacidad del perfil para generar sustentación y Cd su resistencia al flujo, L y D son las fuerzas dimensionales de sustentación y arrastre, respectivamente, L/D representa la eficiencia aerodinámica del perfil.

Figura 53

Relación sustentación - arrastre NACA 11H09



Nota. Elaboración propia a partir de datos simulados.

La Figura 53, muestra que el perfil NACA 11H09 presenta un pico abrupto de eficiencia a los 9 m/s, con un valor de L/D cercano a 5.0, significativamente superior al de los demás perfiles. Sin embargo, fuera de ese rango, su eficiencia es más baja y estable.

4.1.12 Eficiencia aerodinámica perfil NACA 64(1)212 MOD A

Tabla 38

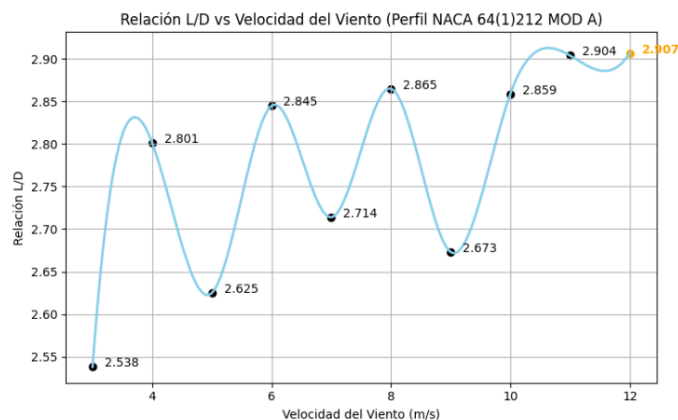
Cálculo de L/D NACA 64(1)212 MOD A

Velocidad del viento (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Área (m ²)	Cl	Cd	L	D	L/D
3	0.797	0.024	0.929	0.366	0.079	0.031	2.538
4			0.916	0.327	0.139	0.050	2.801
5			0.924	0.352	0.219	0.083	2.625
6			0.916	0.322	0.312	0.110	2.845
7			0.92	0.339	0.427	0.157	2.714
8			0.914	0.319	0.554	0.193	2.865
9			0.925	0.346	0.709	0.265	2.673
10			0.912	0.319	0.863	0.302	2.859
11			0.909	0.313	1.041	0.358	2.904
12			0.91	0.313	1.240	0.427	2.907

Nota: Área (m²) es el área de referencia (cuerda del perfil * envergadura), Cl y Cd son los coeficientes adimensionales de sustentación y arrastre obtenidos en QBlade, Cl indica la capacidad del perfil para generar sustentación y Cd su resistencia al flujo, L y D son las fuerzas dimensionales de sustentación y arrastre, respectivamente, L/D representa la eficiencia aerodinámica del perfil.

Figura 54

Relación sustentación - arrastre NACA 64(1)212 MOD A



Nota. Elaboración propia a partir de datos simulados.

La Figura 54, muestra que el perfil NACA 64(1)212 MOD A presenta una tendencia ascendente con máximos progresivos en L/D, alcanzando aproximadamente 2.907 a 12 m/s. A pesar de algunas oscilaciones, su eficiencia mejora conforme aumenta la velocidad, siendo adecuado para vientos fuertes.

4.1.13 Comparativa L/D (Eficiencia aerodinámica)

Tabla 39

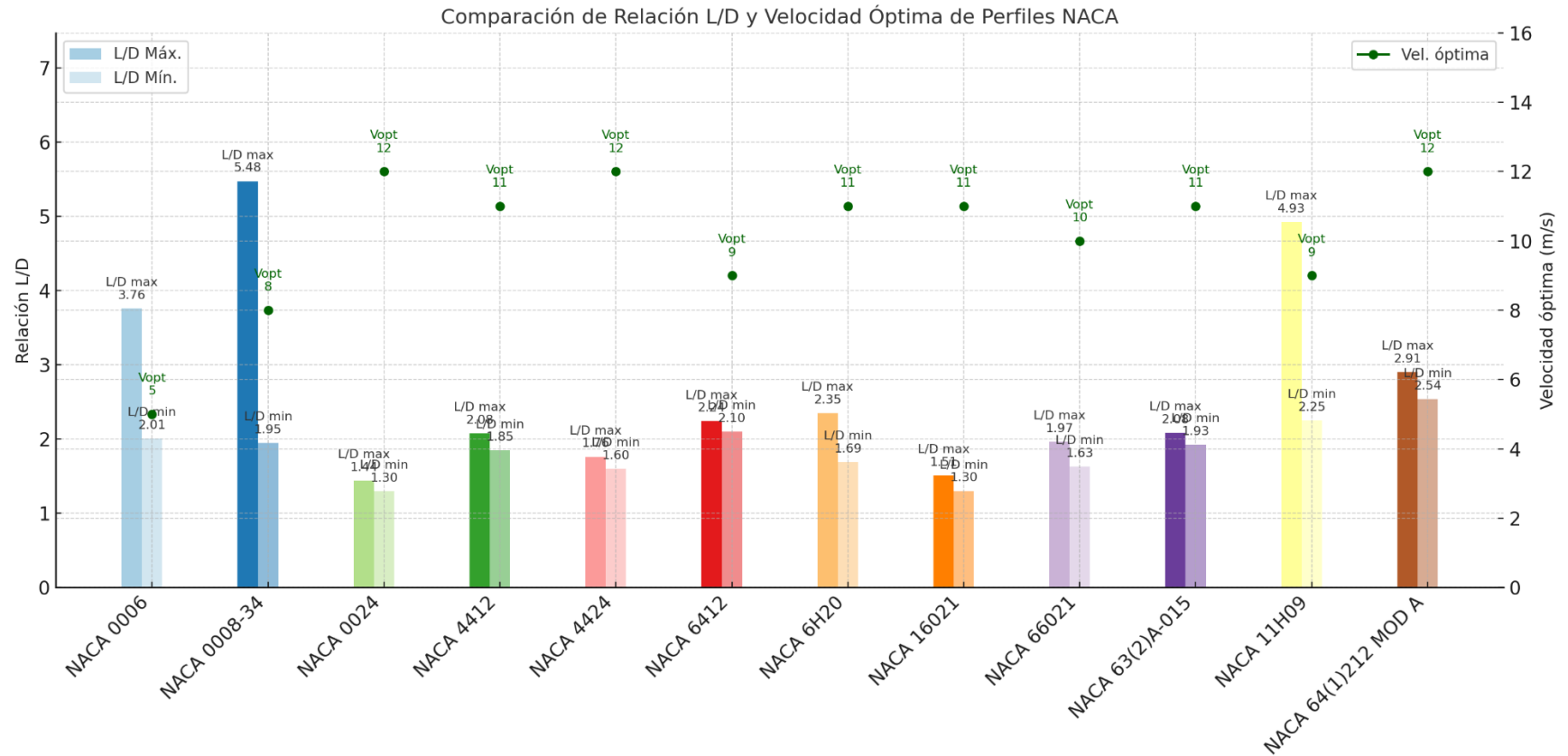
Resumen de la relación L/D máxima y mínima para perfiles NACA, con velocidad de viento correspondiente

Nº	Perfil NACA	Velocidad Óptima (m/s)	L/D Máx.	Vel. De L/D mín. (m/s)	L/D Mín.
1	NACA 0006	5	3.76	11	2.011
2	NACA 0008-34	8	5.476	4	1.951
3	NACA 0024	12	1.444	3	1.298
4	NACA 4412	11	2.079	4	1.848
5	NACA 4424	12	1.764	3	1.599
6	NACA 6412	9	2.242	4	2.099
7	NACA 6H20	11	2.349	6	1.693
8	NACA 16021	11	1.508	3	1.302
9	NACA 66021	10	1.967	11	1.633
10	NACA 63(2)A-015	11	2.084	3	1.926
11	NACA 11H09	9	4.927	4	2.253
12	NACA 64(1)212 MOD A	12	2.907	3	2.538

Nota: La tabla resume la relación sustentación/arrastre (L/D) máxima y mínima de cada perfil, su tipo y la velocidad del viento en la que alcanzaron su mayor eficiencia aerodinámica, según simulaciones en QBlade.

Figura 55

Comparación de la relación L/D vs Velocidad del viento





Nota. Gráfico comparativo de la relación sustentación/arrastre (L/D) en función de la velocidad del viento para doce perfiles aerodinámicos NACA. Entre los más destacados, el perfil NACA 0008-34 alcanzó un valor máximo con 5.476 a 8 m/s, seguido del NACA 11H09 de L/D de 4.927 a 9 m/s, y el NACA 0006 con 3.76 a 5 m/s.




4.2 Resultados de la fabricación de perfiles en impresión 3D

Como parte del segundo objetivo específico, se fabricaron doce juegos de perfiles aerodinámicos NACA mediante la técnica de impresión 3D, utilizando filamento PLA. El procedimiento detallado se encuentra descrito en la sección de metodología (ver punto 3.3.2). El proceso de fabricación fue exitoso en términos de precisión, repetibilidad y tiempo de producción.

Tabla 40

Perfiles aerodinámicos NACA fabricados mediante impresión 3D

Nº	Perfil NACA	Tipo	Características	Imagen
1	0006	Simétrico	0% curvatura	
2	0008-34	Simétrico	0% curvatura; 8% espesor máximo	

3	0024	Simétrico	0% curvatura; 24% espesor máximo	
4	4412	Asimétrico	4% curvatura; 12% espesor	
5	4424	Asimétrico	4% curvatura; 24% espesor	

6

6412

Asimétrico

6% curvatura; 12%
espesor



7

6H20

Asimétrico

Serie H de NACA 6:
optimizada para baja
resistencia; 20% espesor



8

16021

Asimétrico

16% curvatura; 21%
espesor



9 66021 Asimétrico 21% espesor



10 63(2)A-015 Asimétrico espesor 15%
modificado



11 11H09 Asimétrico Serie H con espesor 9%



12	64(1)212 MOD A	Asimétrico (Perfil modificado)	Serie 6, 12% espesor modificado
-----------	-------------------	--------------------------------------	------------------------------------



Nota: La tabla muestra los perfiles aerodinámicos NACA fabricados mediante impresión 3D como parte del Objetivo Específico 2. Cada grupo corresponde a una geometría distinta, seleccionada en función de sus características aerodinámicas, simetría y espesor relativo. Los modelos fueron desarrollados en software y fabricados utilizando filamento PLA. Elaboración propia adaptado de Tools (2023).

4.3 Resultados experimentales en túnel de viento

4.3.1 Eficiencia eléctrica perfil NACA 0006

Tabla 41

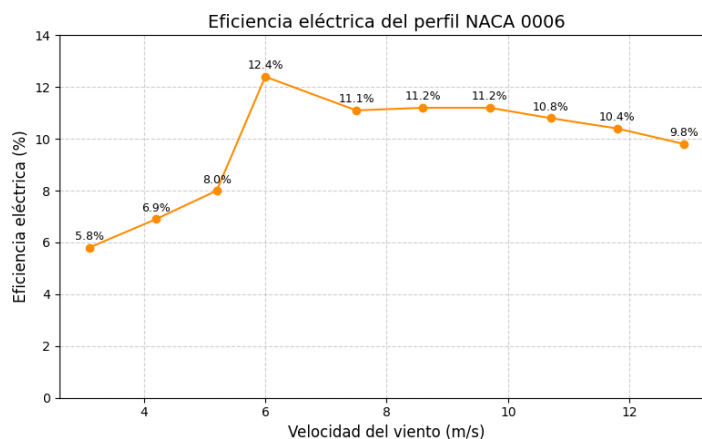
Eficiencia eléctrica del perfil NACA 0006

Vel. (m/s)	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia eléctrica (W)	Potencia eólica (W)	Eficiencia (%)
3.1	11	0.028	0.303	5.22	5.8
4.2	11	0.081	0.896	12.99	6.9
5.2	11.2	0.176	1.971	24.64	8
6	11.1	0.423	4.698	37.86	12.4
7.5	11.3	0.726	8.208	73.94	11.1
8.6	11.2	1.151	12.886	111.48	11.2
9.7	11.4	1.571	17.916	159.96	11.2
10.7	11.3	2.053	23.188	214.71	10.8
11.8	11.4	2.626	29.949	287.97	10.4
12.9	11.1	3.249	36.073	376.25	9.8

Nota. La Tabla 41, muestra datos medidos de las pruebas para determinar la eficiencia eléctrica del perfil NACA 0006.

Figura 56

Eficiencia eléctrica del perfil NACA 0006



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales.

La Figura 56, muestra un aumento progresivo de la eficiencia, alcanzando un valor máximo de 12.4 % a 6 m/s. Posteriormente, se observa una tendencia decreciente en la eficiencia para

velocidades superiores, lo cual indica que el perfil presenta su mejor desempeño en un rango medio de velocidades.

4.3.2 Eficiencia eléctrica perfil NACA 0008-34

Tabla 42

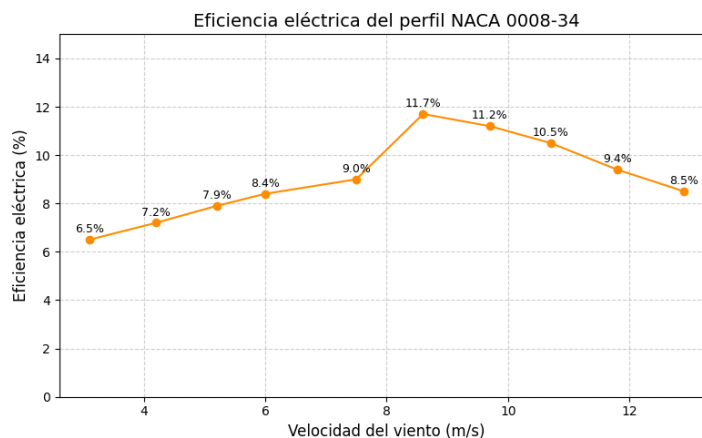
Eficiencia eléctrica del perfil NACA 0008-34

Vel. (m/s)	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia eléctrica (W)	Potencia eólica (W)	Eficiencia (%)
3.1	11.3	0.024	0.274	4.21	6.5
4.2	11.3	0.066	0.751	10.46	7.2
5.2	11.3	0.139	1.571	19.85	7.9
6	11.4	0.225	2.563	30.49	8.4
7.5	11.4	0.47	5.358	59.55	9
8.6	11.4	0.723	8.242	89.79	11.7
9.7	11.4	0.887	10.117	128.84	11.2
10.7	11.3	1.45	16.385	172.94	10.5
11.8	11.3	1.724	19.471	231.94	9.4
12.9	11.3	2.014	22.792	303.04	8.5

Nota. La Tabla 42, muestra datos medidos de las pruebas para determinar la eficiencia eléctrica del perfil NACA 0008-34.

Figura 57

Eficiencia eléctrica del perfil NACA 0008-34



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales.

La Figura 57, muestra que la eficiencia eléctrica aumenta moderadamente a bajas velocidades del viento, alcanzando un máximo de 11,7% a 8,6 m/s. A partir de este punto, la eficiencia

tiende a disminuir progresivamente con el incremento de la velocidad, lo que sugiere un rendimiento óptimo en rangos medios.

4.3.3 Eficiencia eléctrica perfil NACA 0024

Tabla 43

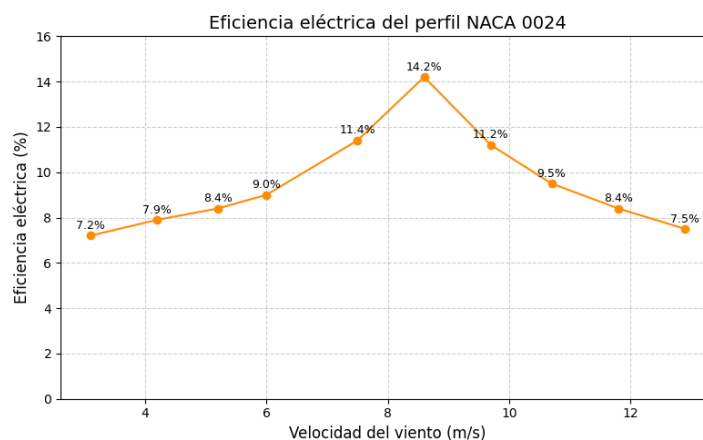
Eficiencia eléctrica del perfil NACA 0024

Vel. (m/s)	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia eléctrica (W)	Potencia eólica (W)	Eficiencia (%)
3.1	11.3	0.087	0.98	13.67	7.2
4.2	11.3	0.129	1.46	18.56	7.9
5.2	11.3	0.17	1.94	23	8.4
6	11.4	0.22	2.51	28	9
7.5	11.4	0.687	7.83	68.71	11.4
8.6	11.4	1.291	14.72	103.59	14.2
9.7	11.4	1.46	16.64	148.64	11.2
10.7	11.3	1.678	18.96	199.52	9.5
11.8	11.3	1.99	22.49	267.59	8.4
12.9	11.3	2.321	26.23	349.62	7.5

Nota. La Tabla 43, muestra datos medidos de las pruebas para determinar la eficiencia eléctrica del perfil NACA 0024.

Figura 58

Eficiencia eléctrica del perfil NACA 0024



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales.

La Figura 58, muestra un incremento progresivo de la eficiencia eléctrica del perfil NACA 0024, alcanzando un valor máximo de 14,2 % a los 8,6 m/s. A partir de esta velocidad, se evidencia

una disminución continua, lo que indica que el perfil presenta su mejor desempeño eléctrico en condiciones de viento medio.

4.3.4 Eficiencia eléctrica perfil NACA 4412

Tabla 44

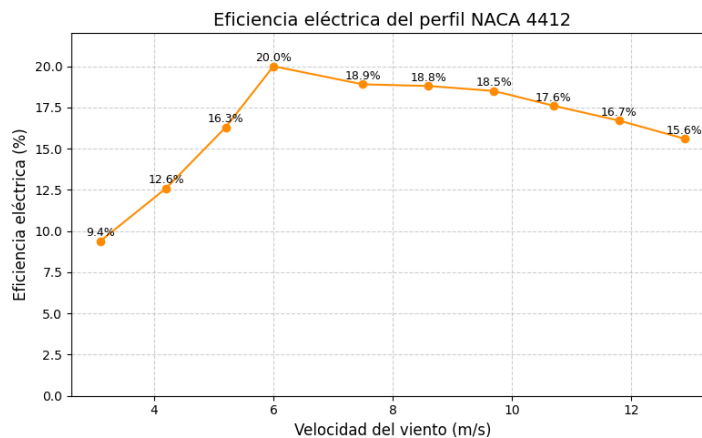
Eficiencia eléctrica del perfil NACA 4412

Vel. (m/s)	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia eléctrica (W)	Potencia eólica (W)	Eficiencia (%)
3.1	11.2	0.047	0.53	5.6	9.4
4.2	11.2	0.157	1.76	13.93	12.6
5.2	11.3	0.381	4.31	26.44	16.3
6	11.3	0.719	8.12	40.61	20
7.5	11.4	1.315	14.99	79.32	18.9
8.6	11.4	1.971	22.48	119.59	18.8
9.7	11.4	2.785	31.75	171.6	18.5
10.7	11.3	3.588	40.54	230.33	17.6
11.8	11.3	4.566	51.59	308.92	16.7
12.9	11.2	5.62	62.96	403.62	15.6

Nota. La Tabla 44, muestra datos medidos de las pruebas para determinar la eficiencia eléctrica del perfil NACA 4412.

Figura 59

Eficiencia eléctrica del perfil NACA 4412



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales.

La Figura 59, muestra una tendencia creciente de la eficiencia eléctrica del perfil NACA 4412 hasta alcanzar un valor máximo del 20 % a una velocidad de 6 m/s. Posteriormente, la eficiencia

presenta una leve disminución progresiva. Este comportamiento sugiere un desempeño eficiente y estable en un amplio espectro de velocidades del viento.

4.3.5 Eficiencia eléctrica perfil NACA 4424

Tabla 45

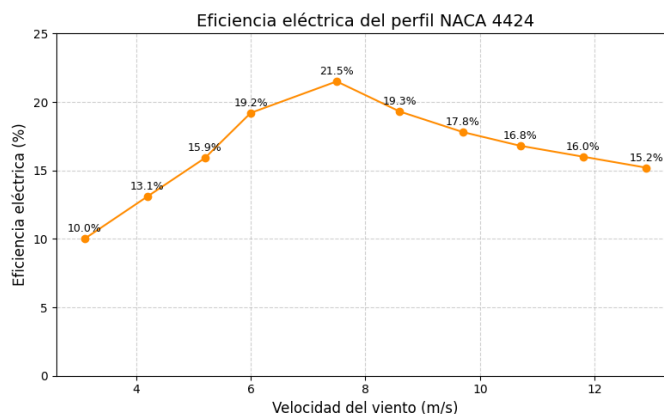
Eficiencia eléctrica del perfil NACA 4424

Vel. (m/s)	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia eléctrica (W)	Potencia eólica (W)	Eficiencia (%)
3.1	11.42	0.05	0.569	5.69	10
4.2	11.4	0.163	1.855	14.15	13.1
5.2	11.41	0.374	4.272	26.85	15.9
6	11.42	0.693	7.917	41.24	19.2
7.5	11.52	1.508	17.373	80.55	21.5
8.6	11.52	2.033	23.425	121.44	19.3
9.7	11.51	2.692	31.004	174.25	17.8
10.7	11.5	3.416	39.291	233.89	16.8
11.8	11.5	4.365	50.192	313.7	16
12.9	11.5	5.417	62.301	409.86	15.2

Nota. La Tabla 45, muestra datos medidos de las pruebas para determinar la eficiencia eléctrica del perfil NACA 4424.

Figura 60

Eficiencia eléctrica del perfil NACA 4424



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales.

La Figura 60, evidencia una mejora progresiva de la eficiencia eléctrica hasta alcanzar un máximo del 21,5 % a una velocidad de 7,5 m/s. A partir de este punto, la eficiencia decrece de

manera paulatina. Este comportamiento indica un alto rendimiento del perfil en velocidades intermedias, con una eficiencia estable.

4.3.6 Eficiencia eléctrica perfil NACA 6412

Tabla 46

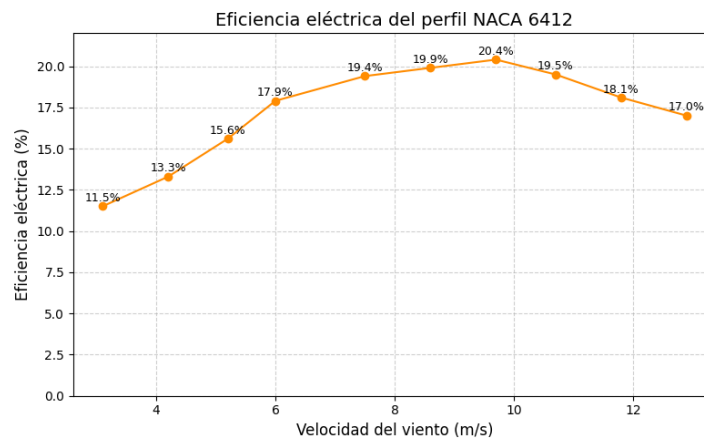
Eficiencia eléctrica del perfil NACA 6412

Vel. (m/s)	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia eléctrica (W)	Potencia eólica (W)	Eficiencia (%)
3.1	11.3	0.048	0.537	4.67	11.5
4.2	11.32	0.136	1.543	11.6	13.3
5.2	11.34	0.303	3.435	22.02	15.6
6	11.37	0.533	6.06	33.83	17.9
7.5	11.39	1.125	12.818	66.08	19.4
8.6	11.41	1.737	19.823	99.62	19.9
9.7	11.43	2.551	29.163	142.95	20.4
10.7	11.46	3.266	37.423	191.87	19.5
11.8	11.48	4.037	46.368	257.34	18.1
12.9	11.5	4.969	57.159	336.23	17

Nota. La Tabla 46, muestra datos medidos de las pruebas para determinar la eficiencia eléctrica del perfil NACA 6412.

Figura 61

Eficiencia eléctrica del perfil NACA 6412



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales.

La Figura 61, muestra un aumento progresivo y constante de la eficiencia eléctrica hasta alcanzar un valor máximo del 20,4% a una velocidad de 9,7 m/s. Este comportamiento

evidencia un rendimiento altamente eficiente del perfil en un amplio rango de velocidades, lo cual lo posiciona como una alternativa favorable para condiciones de viento medio a fuerte.

4.3.7 Eficiencia eléctrica perfil NACA 6H20

Tabla 47

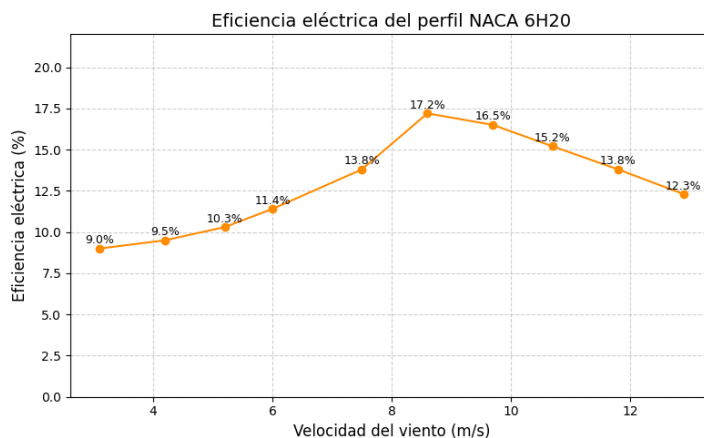
Eficiencia eléctrica del perfil NACA 6H20

Vel. (m/s)	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia eléctrica (W)	Potencia eólica (W)	Eficiencia (%)
3.1	11.49	0.038	0.432	4.8	9
4.2	11.5	0.099	1.134	11.93	9.5
5.2	11.52	0.203	2.334	22.65	10.3
6	11.48	0.345	3.962	34.79	11.4
7.5	11.5	0.816	9.384	67.95	13.8
8.6	11.52	1.53	17.623	102.45	17.2
9.7	11.54	2.102	24.255	147	16.5
10.7	11.53	2.602	29.997	197.31	15.2
11.8	11.5	3.171	36.465	264.63	13.8
12.9	11.48	3.703	42.529	345.75	12.3

Nota. La Tabla 47, muestra datos medidos de las pruebas para determinar la eficiencia eléctrica del perfil NACA 6H20.

Figura 62

Eficiencia eléctrica del perfil NACA 6H20



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales.

La Figura 62, muestra que la eficiencia del perfil NACA 6H20 se mantiene estable al inicio y alcanza un máximo del 17,2 % a 8,6 m/s. A partir de esta velocidad, la eficiencia disminuye

progresivamente. Este comportamiento indica un rendimiento moderadamente eficiente, con un pico de desempeño en condiciones de viento medio a fuerte.

4.3.8 Eficiencia eléctrica perfil NACA 16021

Tabla 48

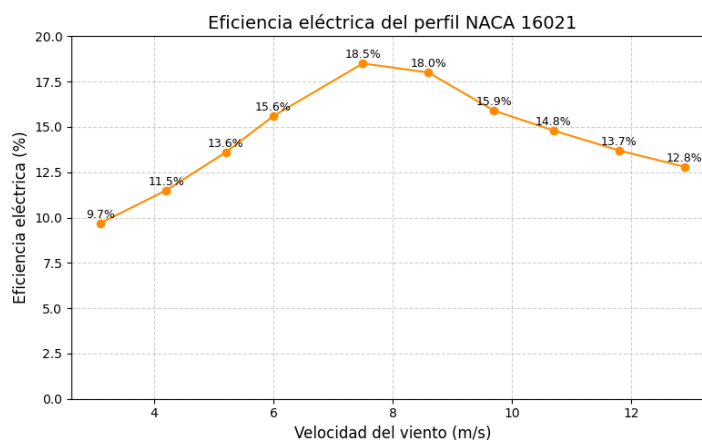
Eficiencia eléctrica del perfil NACA 16021

Vel. (m/s)	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia eléctrica (W)	Potencia eólica (W)	Eficiencia (%)
3.1	11.3	0.042	0.47	4.85	9.7
4.2	11.32	0.123	1.388	12.07	11.5
5.2	11.34	0.275	3.114	22.9	13.6
6	11.35	0.484	5.491	35.18	15.6
7.5	11.38	1.117	12.71	68.7	18.5
8.6	11.41	1.634	18.646	103.59	18
9.7	11.44	2.064	23.615	148.63	15.9
10.7	11.46	2.577	29.526	199.5	14.8
11.8	11.48	3.192	36.653	267.58	13.7
12.9	11.49	3.895	44.749	349.6	12.8

Nota. La Tabla 48, muestra datos medidos de las pruebas para determinar la eficiencia eléctrica del perfil NACA 16021.

Figura 63

Eficiencia eléctrica del perfil NACA 16021



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales.

La Figura 63, muestra un incremento sostenido de la eficiencia eléctrica alcanzando un máximo de 18,5 % a 7,5 m/s. Luego, la eficiencia disminuye progresivamente con el aumento de la

velocidad del viento. Este comportamiento sugiere un rendimiento óptimo en viento medio. El perfil destaca por su eficiencia en condiciones intermedias.

4.3.9 Eficiencia eléctrica perfil NACA 66021

Tabla 49

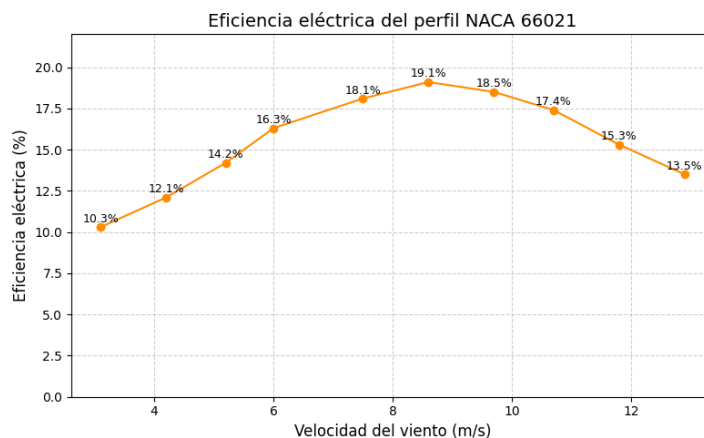
Eficiencia eléctrica del perfil NACA 66021

Vel. (m/s)	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia eléctrica (W)	Potencia eólica (W)	Eficiencia (%)
3.1	11.48	0.047	0.542	5.26	10.3
4.2	11.5	0.138	1.582	13.08	12.1
5.2	11.51	0.306	3.526	24.83	14.2
6	11.52	0.54	6.22	38.15	16.3
7.5	11.54	1.168	13.483	74.51	18.1
8.6	11.56	1.857	21.459	112.34	19.1
9.7	11.55	2.583	29.826	161.19	18.5
10.7	11.53	3.265	37.645	216.36	17.4
11.8	11.51	3.855	44.381	290.18	15.3
12.9	11.49	4.454	51.183	379.13	13.5

Nota. La Tabla 49, muestra datos medidos de las pruebas para determinar la eficiencia eléctrica del perfil NACA 66021.

Figura 64

Eficiencia eléctrica del perfil NACA 66021



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales.

La Figura 64, muestra un aumento progresivo en la eficiencia del perfil NACA 66021, alcanzando un máximo de 19,1 % a 8,6 m/s. Luego, la eficiencia disminuye gradualmente, pero

se mantiene por encima del 13 %. Este perfil presenta un buen desempeño en todo el rango evaluado. Su rendimiento es destacado en condiciones de viento medio a fuerte.

4.3.10 Eficiencia eléctrica perfil NACA 63(2)A-015

Tabla 50

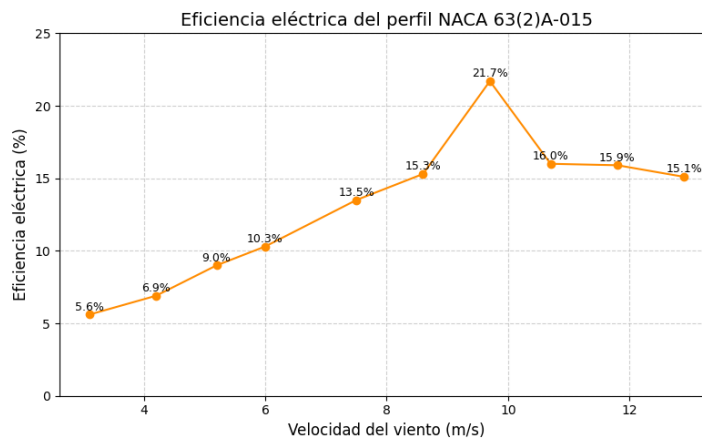
Eficiencia eléctrica del perfil NACA 63(2)A-015

Vel. (m/s)	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia eléctrica (W)	Potencia eólica (W)	Eficiencia (%)
3.1	11.5	0.023	0.264	4.72	5.6
4.2	11.5	0.07	0.81	11.74	6.9
5.2	11.4	0.176	2.004	22.27	9
6	11.3	0.312	3.525	34.21	10.3
7.5	11.5	0.784	9.021	66.82	13.5
8.6	11.5	1.341	15.419	100.75	15.3
9.7	11.5	2.727	31.367	144.56	21.7
10.7	11.3	2.748	31.046	194.04	16
11.8	11.5	3.651	41.984	260.25	15.9
12.9	11.4	4.503	51.343	340.02	15.1

Nota. La Tabla 50, muestra datos medidos de las pruebas para determinar la eficiencia eléctrica del perfil NACA 63(2)A-015.

Figura 65

Eficiencia eléctrica del perfil NACA 63(2)A-015



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales.

La figura 65 muestra un incremento sostenido de eficiencia, alcanzando un máximo de 21,7 % a 9,7 m/s. Luego, la eficiencia disminuye levemente y se estabiliza por encima del 15 %. Este

perfil mantiene buen rendimiento incluso a velocidades altas. El NACA 63(2)A-015 destaca en condiciones de viento medio a fuerte.

4.3.11 Eficiencia eléctrica perfil NACA 11H09

Tabla 51

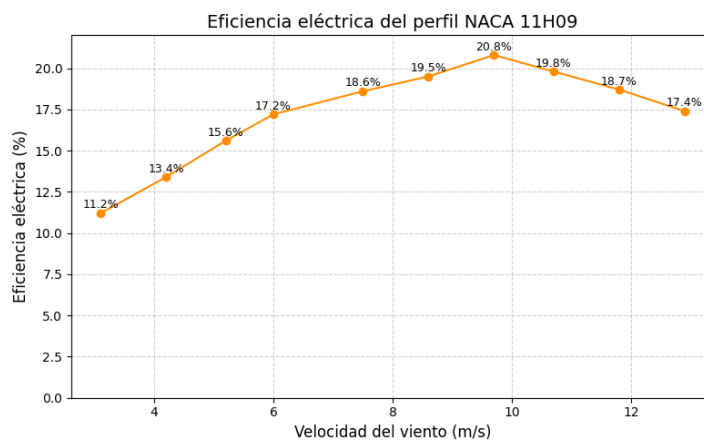
Eficiencia eléctrica del perfil NACA 11H09

Vel. (m/s)	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia eléctrica (W)	Potencia eólica (W)	Eficiencia (%)
3.1	11.35	0.047	0.534	4.772	11.2
4.2	11.36	0.14	1.59	11.867	13.4
5.2	11.37	0.309	3.513	22.521	15.6
6	11.38	0.523	5.953	34.597	17.2
7.5	11.39	1.104	12.57	67.572	18.6
8.6	11.41	1.741	19.864	101.878	19.5
9.7	11.44	2.657	30.4	146.184	20.8
10.7	11.45	3.394	38.873	196.216	19.8
11.8	11.46	4.294	49.205	263.166	18.7
12.9	11.47	5.216	59.823	343.837	17.4

Nota. La Tabla 51, muestra datos medidos de las pruebas para determinar la eficiencia eléctrica del perfil NACA 11H09.

Figura 66

Eficiencia eléctrica del perfil NACA 11H09



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales.

La figura 66 muestra un aumento sostenido de eficiencia en el perfil NACA 11H09, alcanzando un máximo de 20,8 % a 9,7 m/s. Tras este punto, la eficiencia disminuye levemente, pero se

mantiene por encima del 17 %. El perfil presenta un desempeño eficiente y estable en un amplio rango. Es una opción favorable para condiciones de viento medio a fuerte.

4.3.12 Eficiencia eléctrica perfil NACA 64(1)212 MOD A

Tabla 52

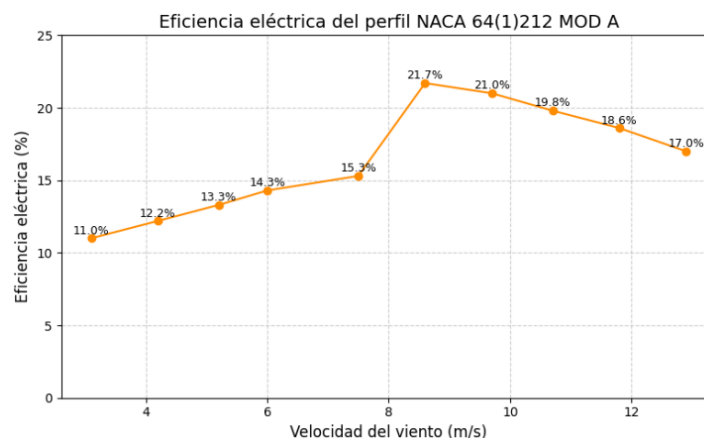
Eficiencia eléctrica del perfil NACA 64(1)212 MOD A

Vel. (m/s)	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia eléctrica (W)	Potencia eólica (W)	Eficiencia (%)
3.1	11.5	0.045	0.516	4.692	11
4.2	11.51	0.124	1.423	11.67	12.2
5.2	11.52	0.256	2.947	22.147	13.3
6	11.53	0.422	4.867	34.022	14.3
7.5	11.5	0.884	10.16	66.449	15.3
8.6	11.53	1.885	21.745	100.185	21.7
9.7	11.49	2.627	30.188	143.754	21
10.7	11.55	3.31	38.225	192.955	19.8
11.8	11.54	4.171	48.135	258.792	18.6
12.9	11.5	5	57.481	338.123	17

Nota. La Tabla 52, muestra datos medidos de las pruebas para determinar la eficiencia eléctrica del perfil NACA 64(1)212 MOD A.

Figura 67

Eficiencia eléctrica del perfil NACA 64(1)212 MOD



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales.

La Figura 67, evidencia un incremento progresivo de la eficiencia eléctrica desde un 11,0 % a 3,1 m/s hasta alcanzar un valor máximo del 21,7 % a una velocidad de 8,6 m/s. A partir de este

punto, la eficiencia presenta una ligera disminución, manteniéndose por encima del 17 % hasta 12,9 m/s. Este comportamiento sugiere que el perfil NACA 64(1)212 MOD A ofrece un rendimiento eficiente en un amplio rango de velocidades, siendo especialmente efectivo en condiciones de viento medio a fuerte.

4.3.13 Comparación de eficiencia eléctrica

Tabla 53

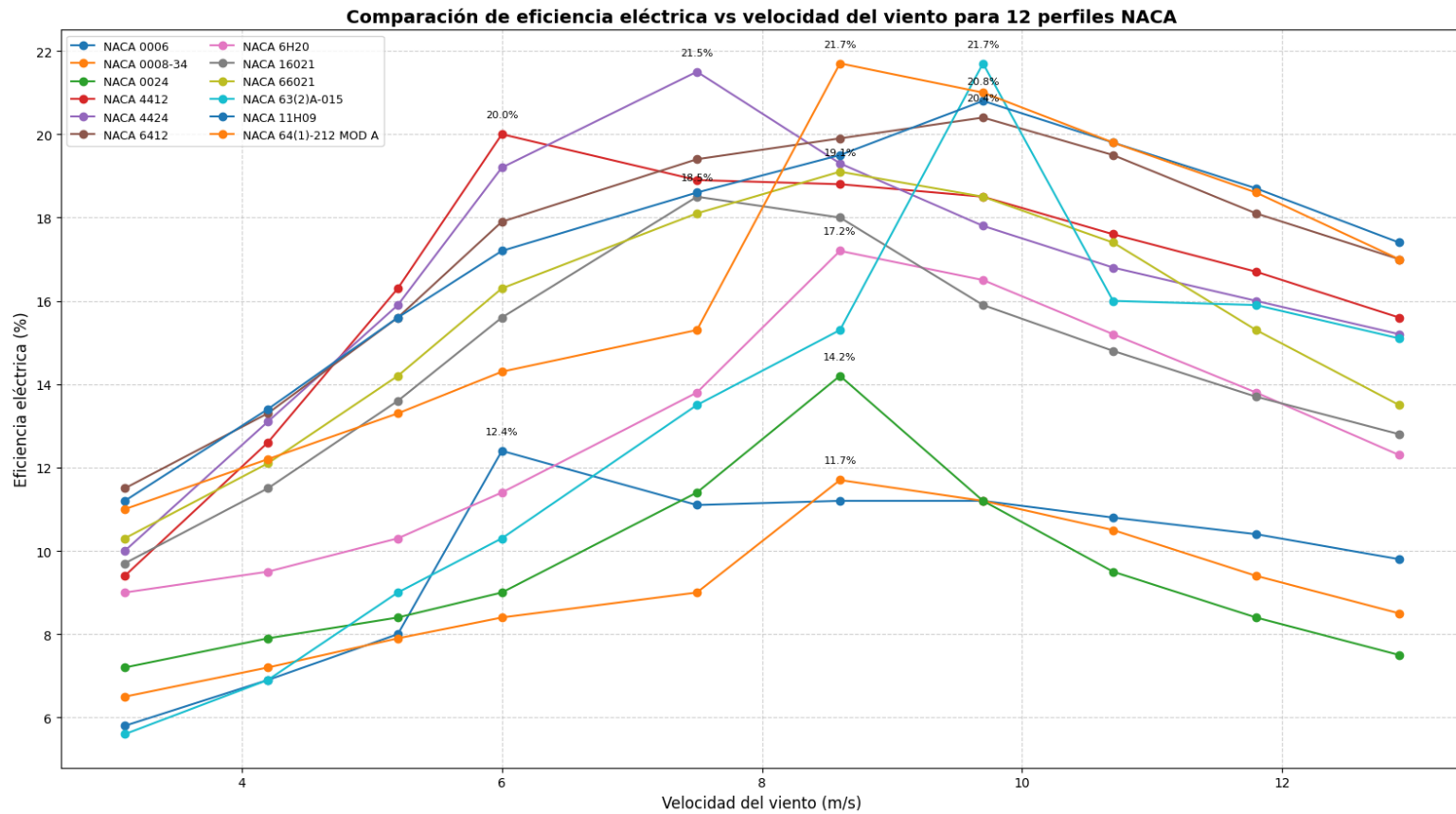
Resumen comparativo de la eficiencia eléctrica de perfiles aerodinámicos NACA

N.º	Nombre del perfil	Velocidad eficiencia mín. (m/s)	Eficiencia mínima (%)	Velocidad óptima (m/s)	Eficiencia máxima (%)
1	NACA 0006	3.1	5.8	6	12.4
2	NACA 0008-34	3.1	6.5	8.6	11.7
3	NACA 0024	3.1	7.2	8.6	14.2
4	NACA 4412	3.1	9.4	6	20
5	NACA 4424	3.1	10	7.5	21.5
6	NACA 6412	3.1	11.5	9.7	20.4
7	NACA 6H20	3.1	9	8.6	17.2
8	NACA 16021	3.1	9.7	7.5	18.5
9	NACA 66021	3.1	10.3	8.6	19.1
10	NACA 63(2)A-015	3.1	5.6	9.7	21.7
11	NACA 11H09	3.1	11.2	9.7	20.8
12	NACA 64(1)-212 MOD A	3.1	11	8.6	21.7

Nota. Elaboración propia con base en resultados experimentales. La velocidad óptima corresponde al punto de máxima eficiencia eléctrica para cada perfil evaluado.

Figura 68

Comparación de la eficiencia eléctrica de doce perfiles NACA



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales.

La Figura 68, muestra la eficiencia eléctrica de los doce perfiles NACA en función de la velocidad del viento. Cada perfil presenta un comportamiento distinto, con algunos alcanzando más del 20 % de eficiencia. Los perfiles NACA 63(2)A-015, 64(1)-212 MOD A,

11H09 y 6412 sobresalen por su alto rendimiento. Sus eficiencias máximas oscilan entre 20 % y 21,7 %. Estos valores se logran principalmente en velocidades medias a altas (8.6–9.7 m/s). En contraste, perfiles como el NACA 0006 y el NACA 0008-34 evidencian eficiencias más reducidas en todo el intervalo evaluado, con valores máximos por debajo del 13 %.

4.4 Análisis y evaluación de la eficiencia de doce perfiles NACA

Tabla 54

Comparación de eficiencia eléctrica y desempeño aerodinámico de perfiles NACA

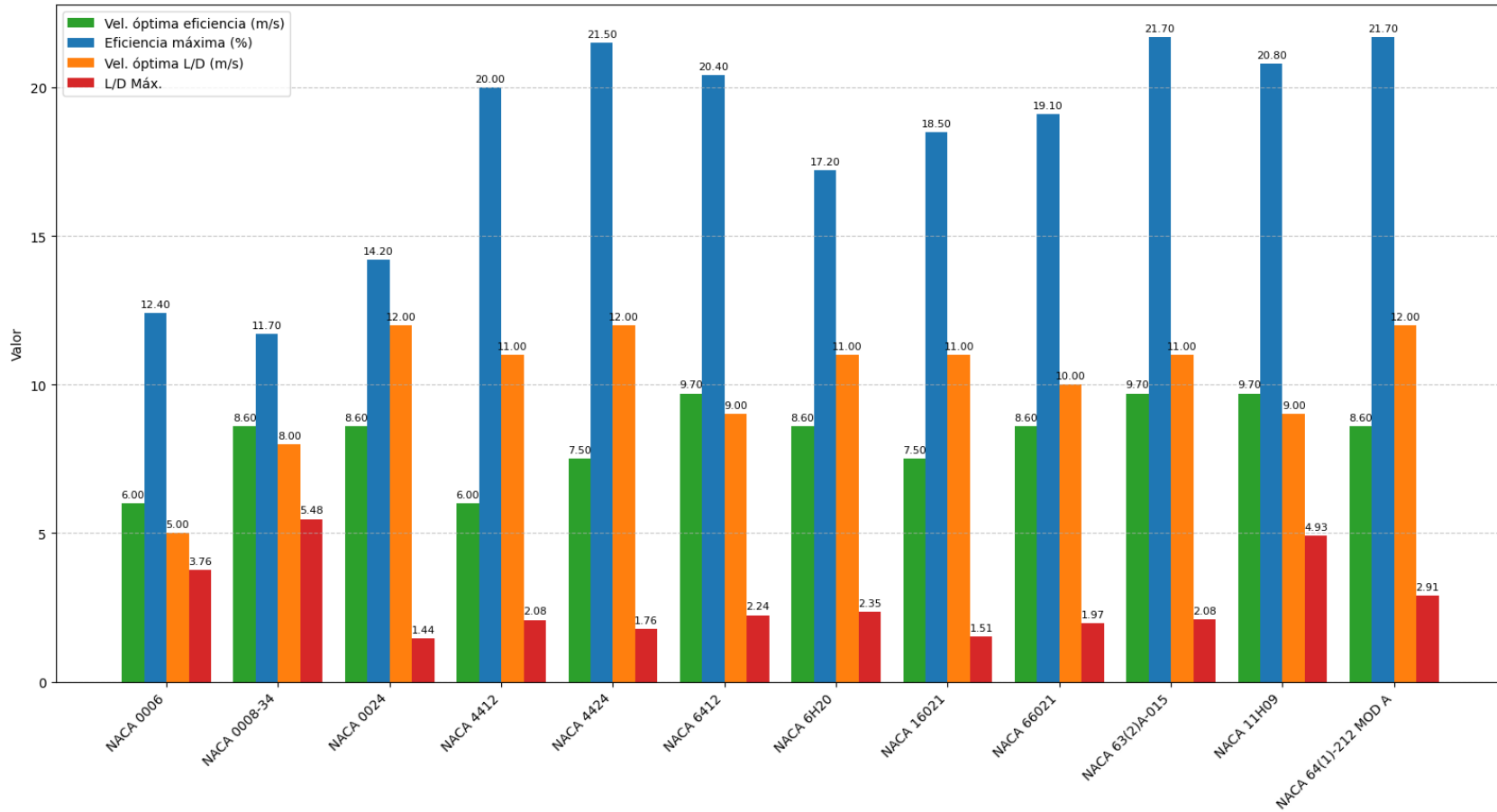
N.º	Nombre del perfil	Velocidad óptima eficiencia eléctrica (m/s)	Eficiencia máxima (%)	Velocidad Óptima L/D (m/s)	L/D Máx.
1	NACA 0006	6	12.4	5	3.76
2	NACA 0008-34	8.6	11.7	8	5.476
3	NACA 0024	8.6	14.2	12	1.444
4	NACA 4412	6	20	11	2.079
5	NACA 4424	7.5	21.5	12	1.764
6	NACA 6412	9.7	20.4	9	2.242
7	NACA 6H20	8.6	17.2	11	2.349
8	NACA 16021	7.5	18.5	11	1.508
9	NACA 66021	8.6	19.1	10	1.967
10	NACA 63(2)A-015	9.7	21.7	11	2.084
11	NACA 11H09	9.7	20.8	9	4.927
12	NACA 64(1)-212 MOD A	8.6	21.7	12	2.907

Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales.

La tabla 54, presenta un resumen comparativo del rendimiento aerodinámico y la eficiencia eléctrica de distintos perfiles NACA utilizados en aerogeneradores, evaluados en función de la velocidad del viento. Se observa que los perfiles con mayores eficiencias eléctricas son el NACA 63(2)A-015 y el NACA 64(1)-212 MOD A, ambos con un 21,7 % de eficiencia máxima, seguidos por el NACA 4424 (21,5 %) y el NACA 11H09 (20,8 %). Estos perfiles alcanzan sus mejores desempeños a velocidades entre 7,5 y 9,7 m/s, correspondientes a condiciones de viento medio a fuerte. En cuanto a la eficiencia aerodinámica, el NACA 11H09 destaca con la mayor relación L/D máxima (4.927), lo que indica un excelente comportamiento en términos de sustentación frente a resistencia.

Figura 69

Relación entre eficiencia eléctrica y eficiencia aerodinámica en perfiles NACA



Nota. Los datos representan las velocidades óptimas de operación, la eficiencia eléctrica máxima y la relación de sustentación/arrastre (L/D) obtenidas en pruebas de túnel de viento para cada perfil NACA.

4.5 Discusiones

Los resultados obtenidos en esta investigación evidencian que no existe una correspondencia directa entre la eficiencia aerodinámica y la eficiencia eléctrica en los perfiles NACA evaluados. El perfil NACA 0008-34, por ejemplo, presentó la mayor relación sustentación/arrastre ($L/D = 5.476$), lo que indica un excelente comportamiento aerodinámico en simulación, pero obtuvo una eficiencia eléctrica baja (11.7 %) en las pruebas experimentales. Esta discrepancia concuerda con lo reportado por Ganiele et al. (2021), quienes observaron que perfiles con bajo arrastre no necesariamente garantizan mayor generación eléctrica, especialmente en turbinas de baja potencia y bajo número de Reynolds.

Los perfiles NACA 63(2)A-015 y 64(1)212 MOD A, de geometría asimétrica modificada, lograron una eficiencia eléctrica del 21.7 % y un desempeño aerodinámico moderado. Esto coincide con Rodríguez (2022), quien destacó el buen rendimiento de perfiles curvados de espesor intermedio, como el SD7032 y el NACA 4412, en aerogeneradores de baja potencia bajo viento moderado. Asimismo, los estudios de Ramírez (2019) y López (2021) señalaron que el NACA 4412 y 2412 equilibran adecuadamente sustentación y resistencia; en esta tesis, el NACA 4412 confirmó un rendimiento intermedio, reafirmando su versatilidad.

A nivel nacional, investigaciones como las de Chuquimamani (2017) y Bardales & Egusquiza (2019) también reconocieron la influencia del ángulo de paso y pequeñas modificaciones geométricas sobre el rendimiento eléctrico de las palas. En línea con ello, esta investigación demuestra que los perfiles modificados, como el 64(1)212 MOD A, pueden superar a sus versiones originales en cuanto a eficiencia energética, destacando la importancia de adaptar los perfiles a condiciones locales mediante herramientas como QBlade.

Finalmente, el uso de impresión 3D con filamento PLA permitió fabricar con precisión los perfiles evaluados, lo cual no solo facilitó la validación experimental, sino que también confirma lo planteado en la justificación económica y técnica: la fabricación aditiva es una alternativa viable, económica y reproducible para estudios experimentales en energías renovables.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En cumplimiento del objetivo general, que fue analizar y evaluar la eficiencia de doce perfiles aerodinámicos NACA aplicables a aerogeneradores de eje horizontal bajo condiciones de viento variable y estable, se logró identificar diferencias significativas en el comportamiento aerodinámico y eléctrico de los perfiles. Asimismo, se cumplieron satisfactoriamente los tres objetivos específicos, relacionados con la simulación aerodinámica, la fabricación mediante impresión 3D y la validación experimental en túnel de viento.

En el análisis aerodinámico realizado con el software Qblade, el perfil NACA 0008-34 obtuvo la mayor relación sustentación/arrastre (L/D) con un valor de 5.476 a una velocidad de viento de 9 m/s, siendo el perfil más eficiente desde el punto de vista aerodinámico. No obstante, esta eficiencia no se reflejó en su desempeño eléctrico durante las pruebas experimentales.

En cuanto al proceso de fabricación, se logró construir exitosamente los doce perfiles seleccionados mediante impresión 3D en material PLA en un tiempo aproximado de 8 a 9 horas por perfil dependiendo de la complejidad geométrica, cumpliendo con las dimensiones de diseño NACA, lo que facilitó la evaluación bajo condiciones controladas de túnel de viento.

Respecto a la eficiencia eléctrica, los perfiles NACA 63(2)A-015 y NACA 64(1)212 MOD A alcanzaron los mejores resultados, con una eficiencia del 21.7 %, a velocidades de 8 y 9 m/s, respectivamente. Este resultado evidencia que los perfiles asimétricos o modificados permiten una mejor conversión de energía, debido a su favorable balance entre sustentación y arrastre.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda analizar perfiles aerodinámicos diseñados para bajos números de Reynolds, como los perfiles S-series del NREL los cuales podrían superar en desempeño a ciertos perfiles NACA tradicionales, e incluir variaciones del ángulo de ataque en futuras pruebas, a fin de evaluar su influencia en la eficiencia eléctrica y en los coeficientes aerodinámicos, siguiendo enfoques similares a los empleados por López (2021) con el perfil NACA 4412.

Se sugiere replicar los ensayos a escala real e instalarlos en condiciones locales. Dado el limitado número de estudios sobre aerogeneradores en el altiplano peruano, sería valioso desarrollar una base de datos regional que registre características del viento, desempeño de perfiles y eficiencia de equipos, lo que permitiría diseñar turbinas mejor adaptadas a las condiciones ambientales y socioeconómicas de la zona.

Se propone usar perfiles asimétricos y modificados, como el NACA 63(2)A-015 y el NACA 64(1)-212 MOD A, que mostraron alta eficiencia eléctrica, y ampliar el rango de velocidades del viento evaluadas, incluyendo valores por encima de 10 m/s, para analizar el comportamiento de los perfiles en condiciones extremas y garantizar su rendimiento en escenarios reales.

Finalmente, se recomienda complementar futuros estudios con aerogeneradores acoplados a sistemas de almacenamiento energético, lo cual permitiría una evaluación más precisa de la conversión eléctrica bajo condiciones operativas reales. Y fomentar el uso de impresión 3D por su bajo costo y utilidad en investigación y formación. La metodología híbrida aplicada en este estudio —basada en simulación y validación experimental— demostró ser efectiva para identificar perfiles aerodinámicos eficientes, aportando al diseño de aerogeneradores de baja potencia adaptados a contextos altoandinos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbott, I., & Von Doenhoff, A. (1959). *Theory of wing sections: Including a summary of airfoil data*. Dover Publications.
- Ackermann, T., & Söder, L. (2002). An overview of wind energy—status 2002. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1–2), 67–127. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00008-4](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00008-4)
- Amada44. (2007). *Aeroforces.svg*. Wikimedia Commons. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aeroforces.svg>
- Anderson, J. (2010). *Fundamentals of aerodynamics* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Association, D. (2003). *Danish Wind Industry Association*. <http://drømstrøre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/pictures/lacour.htm>
- Bardales, E., & Egusquiza, T. (2019). *Influencia del paso variable de los álabes en la regulación de potencia de un aerogenerador tripala mediante SolidWorks Flow Simulation* [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional del Santa]. Repositorio Institucional UNSA. <https://hdl.handle.net/20.500.14278/3550>
- Betz, A. (1920). Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren. *Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen*, 26, 307–309.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2011). *Wind energy handbook* (2nd ed.). Wiley.
- Carantoña, A. (2009). *Análisis del comportamiento aerodinámico de perfiles empleados en aerogeneradores de baja potencia*. <http://www.fglongatt.org.ve>
- Carmona, A. (2000). *Aerodinámica y actuaciones del avión*. Paraninfo.
- Celik, Y. (2022). A comparative aerodynamic analysis of NACA and NREL aerofoils for Darrieus turbines using CFD. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 6(1), 111–117. <https://doi.org/10.46460/ijiea.1075684>
- Chandler, D. (2020). How fluids heat and cool surfaces. *MIT News*. <https://news.mit.edu/2020/how-fluids-heat-cool-surfaces-0428>
- Chuquimamani, B. (2017). *Análisis de la variación del perfil alar en una turbina eólica de baja potencia* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio Institucional UNSA.

- Cumulonimbo. (2017). El código NACA de 4 y 5 dígitos. *El vuelo de la Gran Avutarda*. <https://greatbustardsflight.blogspot.com/2017/01/el-codigo-naca-de-4-y-5-digitos.html>
- Diario, E. (2017). Una tendencia que crece a nivel mundial (p. 2). *Cooperativa de Trabajo Comunicar Ltda*.
- EcoInventos. (2022). *LS Savonius 3.0*. <https://ecoinventos.com/ls-savonius-3-0/>
- EcuRed. (2018). *Túnel aerodinámico*. https://www.ecured.cu/T%C3%BAnel_aerodin%C3%A1mico#Historia
- ElettronicaVeneta. (s. f.). *Entrenador aerogenerador con túnel de viento: Manual teórico y de funcionamiento* (pp. 60–62). Elettronica Veneta S.p.A.
- Fernández, M. (2019). Flujo laminar y turbulento. *Aerodinámica F1*. <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/10/flujo-laminar-y-turbulento/>
- Gamesa, S. (2023). *Siemens Gamesa Renewable Energy: Día del inventor*. <https://www.siemensgamesa.com/es-es/descubrir/revista/2019/11/siemens-gamesa-inventors-day>
- Ganiele, M., Rodríguez, L., & Torres, J. (2021). Diseño y simulación de perfiles aerodinámicos para aerogeneradores de baja potencia. *Revista de Energías Renovables*, 18(2), 45–56.
- García, M. (2010). Aerodinámica. En M. García, *Diseño de un UAV ligero de propulsión eléctrica para monitorización medioambiental* (pp. 35–72). Universidad de Sevilla.
- Gasch, R., & Twele, J. (2011). *Wind power plants: Fundamentals, design, construction and operation* (2nd ed.). Springer.
- Gestión. (2023). Matriz energética: Editorial de Gestión. *Diario Gestión*. <https://gestion.pe/opinion/editorial/matriz-energetica-editorial-de-gestion-rer-electricidad-peru-energia-eolica-gobiernos-combustible-fosil-noticia/>
- González, C., Esteban, W., & Baldera, J. (2014). Diseño aerodinámico de un túnel de viento de bajas velocidades. *Revista de Investigación de Física*.
- Hangar, E. (2021). *Curso de aerodinámica*. Udemy. <https://www.udemy.com/user/hangar-edu/>
- Hansen, M. (2015). *Aerodynamics of wind turbines (2nd ed.)*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315769981>
- Hau, E. (2013). *Wind turbines: Fundamentals, technologies, application, economics* (3rd ed.). Springer.

- Heinberg, R., & Fridley, D. (2016). *Our renewable future: Laying the path for one hundred percent clean energy*. Island Press.
- Hernández, S. (2014). Concepción o elección del diseño de investigación. En S. Hernández, *Metodología de la investigación* (pp. 126–127). McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- International Energy Agency (IEA). (2023). *World Energy Outlook 2023*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- International Renewable Energy Agency. (2020). *Renewable energy: A gender perspective*. <https://www.irena.org/publications/2020/Jan/Renewable-Energy-A-Gender-Perspective>
- Leishman, G. (2022). Maximum lift, stalling, spinning. En *Introduction to aerospace flight vehicles*. Embry-Riddle Aeronautical University. <https://eaglepubs.erau.edu/introductiontoaerospaceflightvehicles/chapter/maximum-lift-stalling-spinning/>
- López, O. (2021). *Estudio aerodinámico de un perfil NACA* [Tesis de licenciatura, Universitat Politècnica de Catalunya].
- Manwell, J., McGowan, J., & Rogers, A. (2010). *Wind energy explained: Theory, design and application* (2nd ed.). Wiley.
- Mechanics, P. (2019). Cómo funcionan los aerogeneradores. *World Energy Trade*. <https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/energia-eolica/como-funcionan-los-aerogeneradores>
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2008). *Atlas del potencial eólico del Perú*. Dirección General de Electricidad. https://www.minem.gob.pe/_detalle.php?idSector=6&idTitular=2581&idMenu=sub2583&idCateg=1405
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2023). *Estadística Subsector Electricidad abril 2023*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4710392/Estad%C3%Adstica%20Subsector%20Electricidad%20abril%202023.pdf>
- Morales, Y. (2023). Vientos: Tipos y clasificación – explicación. *Docentes Digitales TV*. <https://docentesdigitalestv.org/2023/07/14/vientos-tipos-y-clasificacion-explicacion/>
- Muñoz, M. (2018). *Manual del vuelo*. https://manualvuelo.es/1pbav/13_fuerz.html
- NASA. (1929). *NACA airfoils: Variable density tunnel*. NASA Langley Research Center. <https://www.flickr.com/photos/nasacommons/7605917584/>

- Ngo, T., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Organización de Consumidores y Usuarios. (2022). Energía minieólica, otra forma de autoconsumo. <https://www.ocu.org/vivienda-y-energia/energia-renovable/informe/energia-minieolica>
- Ormazabal. (2025). ¿Cómo funciona un parque eólico terrestre? *Ormazabal Velatia*. <https://www.ormazabal.com/sabes-como-funciona-un-parque-eolico-terrestre/>
- Pablo, D. (2012). *Volar, el sueño del hombre*. <http://pdctdrillasallebonanova.blogspot.com/p/aerodinamica-i.html>
- Pengky. (2020). *Independent pitch system*. <https://www.pengky.cn/zz-horizontal-axis-turbine/09-independent-pitch-system/independent-pitch-system.html>
- Povis, J. (2016). *Estudio comparativo de perfiles aerodinámicos de álabes para una turbina eólica de 3 kW mediante método analítico y simulación numérica* [Tesis de ingeniería mecánica, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP. <https://hdl.handle.net/20.500.12404/7486>
- Ramírez, A. (2019). *Diseño de álabes, rotor y transmisión de un generador eólico de eje horizontal de 500 W* [Tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Pachuca]. https://itp.itpachuca.edu.mx/pdf/repositorio_tesis/17201171.pdf
- Rodríguez, C. (2022). *Análisis aerodinámico de perfiles para el diseño de aerogeneradores de baja potencia en condiciones de viento del Campus de la UNS* [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional del Santa]. Repositorio UNS.
- San Román, Á. (2012). *Diseño de un aerogenerador para uso particular* [Trabajo de fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid].
- Sathyajith, M. (2006). *Wind energy: Fundamentals, resource and economics*. Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-30906-3>
- Solís, B., Llerena, M., Coello, F., Miranda, C., Suclupe, A., Guevara, E., Chávez, D., Morante, J., Santos, W., Chicasaca, J., Rojas, B., Vilela, J., Uzuriaga, J., & Lozano, G. (2019). Energías renovables: Experiencia y perspectivas en la ruta del Perú hacia la transición energética. En D. Schmerler, J. Velarde, A. Gonzáles, & B. Solís (Eds.), *Osinergmin*.
- Spera, D. (2009). *Wind turbine technology: Fundamental concepts of wind turbine engineering*. ASME Press.
- Stull, R. (2017). *Practical meteorology: An algebra-based survey of atmospheric science*. University of British Columbia.

Tools, A. (2023). *Airfoil Tools*. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca4415-il>

Yancachajlla, U., Taípe, C. & Gallegos, J. (2019). *Estimación del Potencial Energético Eólico para la Ciudad de Juliaca, Perú*. ÑAWPARISUN - Revista de Investigación Científica, 1(4), 13-18.

