UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE TÚNEL DE VIENTO AUTOMATIZADO PARA LA EVALUACIÓN AERODINÁMICA DE PERFILES EÓLICOS"

Trabajo de integración curricular previo a la obtención del título de Ingeniero en Energías Renovables

Línea de investigación: Producción industrial y tecnológica sostenible.

Autora:

Ivanna Esthefania Jara Montesdeoca

Director:

PhD. Paul Michael Tafur Escanta

Ibarra – Ecuador 2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	JARA MONTESDEOCA IVANNA ESTHEFANIA

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE TÚNEL DE VIENTO AUTOMATIZADO PARA LA EVALUACIÓN AERODINÁMICA DE PERFILES EÓLICOS
AUTORA:	IVANNA ESTHEFANIA JARA MONTESDEOCA
FECHA: DD / MM / AAAA	08/06/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	■ PREGRADO ☐ POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES
DIRECTOR / ASESOR:	PhD. PAUL MICHAEL TAFUR ESCANTA MSc. JUAN PEDRO ROMERO ASTUDILLO

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 8 días del mes de junio de 2026

AUTORA:

Ivanna Esthefania Jara Montesdeoca
Time Stamping Security Data

(Firma)……
Nombre: Ivanna Esthefania Jara Montesdeoca

CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTERGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 08 de junio de 2026

PhD. Paul Michael Tafur Escanta

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
PAUL MICHAEL TAFUR ESCANTA

(f) ……
PhD. Paul Michael Tafur Escanta

C.C.: 1003867353

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificador del Trabajo de Integración Curricular "CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE TÚNEL DE VIENTO AUTOMATIZADO PARA LA EVALUACIÓN AERODINÁMICA DE PERFILES EÓLICOS" elaborado por JARA MONTESDEOCA IVANNA ESTHEFANIA, previo a la obtención del título de INGENIERA EN ENERGÍAS RENOVABLES, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
PAUL MICHAEL TAFUR ESCANTA

(f):…….

TUTOR: PhD. Paul Michael Tafur Escanta

C.C.: 1003867353



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JUAN PEDRO ROMERO ASTUDILLO

(f):…….

ASESOR: MSc. Juan Pedro Romero Astudillo

C.C: 1003013768



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JUAN CARLOS GARCIA MONTOYA

(f):…….

BIOMETRISTA: PhD. Juan Carlos García Montoya

C.C.: 1002279535

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo de investigación a mi mamá, por su amor incondicional, esfuerzo y apoyo a lo largo de mi formación académica y personal. A mi papá, que, a pesar de la distancia, cuento con su apoyo. Y a mi familia y amigos que me brindaron su apoyo y confianza para terminar este trabajo de buena manera.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer el apoyo recibido de los docentes de la carrera durante todos estos años de estudio, especialmente a mi tutor, el PhD. Paúl Tafur ya que con su conocimiento, experiencia, apoyo y paciencia durante todo este tiempo se me fue posible terminar este trabajo de manera gratificante. A mi familia, sobre todo a mi mamá que ha estado siempre presente en toda mi trayectoria académica y personal, en particular en la realización de este proyecto. Por último, quiero agradecer la compañía de mi compañero y mejor amigo Haku que estuvo conmigo desde el inicio de la carrera, pero lamentablemente no logró acompañarme hasta el final.

RESUMEN

Este presente trabajo de titulación tuvo como objetivo diseñar y construir un prototipo de túnel de viento automatizado para la evaluación aerodinámica de perfiles aerodinámicos utilizados en turbinas eólicas, destinado al Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Técnica del Norte en Ibarra, Ecuador. El diseño se desarrolló en SolidWorks utilizando una configuración de túnel de viento subsónico de circuito abierto, que consta de una sección de contracción, una cámara de prueba y un difusor. Para evaluar el desempeño aerodinámico del perfil NACA 6412, se realizaron simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en Ansys Fluent, considerando ángulos de ataque entre 0° y 16° y velocidades del viento de 3, 6 y 10 m/s. Los resultados muestran que el ángulo de ataque de 4° presenta el mejor desempeño aerodinámico, alcanzando un coeficiente de sustentación (Cl) de 0.68 y un coeficiente de arrastre (Cd) de 0.043 a 10 m/s. Posteriormente, se construyó un prototipo que integraba un ventilador de CA, un sistema de control de velocidad con atenuador y un anemómetro digital con conectividad Bluetooth. Además, se desarrolló una interfaz en Python para automatizar la adquisición, el procesamiento y la visualización de los datos experimentales. Las pruebas revelaron velocidades efectivas de 3,00, 4,08 y 4,89 m/s, mostrando tendencias consistentes con los resultados numéricos y un rendimiento aerodinámico mejorado a un ángulo de ataque de 4°. El prototipo desarrollado sirve como herramienta experimental para actividades académicas y estudios relacionados con la energía eólica.

Palabras clave: Túnel de viento, CFD, Ansys Fluent, perfil NACA 6412, coeficientes aerodinámicos.

ABSTRACT

This present thesis aimed to design and build a prototype automated wind tunnel for the aerodynamic evaluation of airfoils used in wind turbines, intended for the Renewable Energy Laboratory of the Technical University of the North in Ibarra, Ecuador. The design was developed in SolidWorks using an open-circuit subsonic wind tunnel configuration, consisting of a contraction section, a test chamber, and a diffuser. To evaluate the aerodynamic performance of the NACA 6412 airfoil, Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations were performed in Ansys Fluent, considering angles of attack between 0° and 16° and wind speeds of 3, 6, and 10 m/s. The results show that the 4° angle of attack exhibits the best aerodynamic performance, achieving a lift coefficient (Cl) of 0.68 and a drag coefficient (Cd) of 0.043 at 10 m/s. Subsequently, a prototype was built integrating an AC fan, a speed control system with an attenuator, and a digital anemometer with Bluetooth connectivity. Additionally, a Python interface was developed to automate the acquisition, processing, and visualization of experimental data. Tests revealed effective speeds of 3.00, 4.08, and 4.89 m/s, showing trends consistent with the numerical results and improved aerodynamic performance at a 4° angle of attack. The developed prototype serves as an experimental tool for academic activities and studies related to wind energy.

Keywords: Wind tunnel, CFD, Ansys Fluent, NACA 6412 airfoil, aerodynamic coefficients.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO I 1

INTRODUCCIÓN 1

1.1 Problema de investigación 1

1.2 Justificación 3

1.3 Objetivos 6

1.3.1 Objetivo General *6*

1.3.2 Objetivos Específicos *6*

1.4 Pregunta de Investigación 6

1.5 Hipótesis 6

1.5.1 Hipótesis Nula (Ho) *6*

1.5.2 Hipótesis Alternativa (Ha) *6*

CAPITULO II 7

MARCO TEÓRICO 7

2.1 Recurso eólico 7

2.1.1 Velocidad de viento *7*

2.1.2 Variabilidad de la velocidad de viento *7*

2.1.3 Perfil vertical de la velocidad de viento *8*

2.1.4 Rugosidad *9*

2.1.5 Condiciones climáticas *9*

2.1.6 Turbulencia *10*

2.1.7 Densidad de potencia *11*

2.1.8 Limite de Betz *11*

2.1.9 Potencia aprovechable *11*

2.2 Aerogeneradores 12

2.2.1 Turbinas de eje horizontal (HAWT) *13*

2.2.2 Turbinas de eje vertical (VAWT) *14*

2.3 Perfiles aerodinámicos 14

2.3.1 Serie de perfiles NACA *15*

2.3.2 Partes de un perfil aerodinámico *17*

2.4 Aerodinámica 19

2.4.1 Número de Reynolds *19*

2.4.2 Número de Mach *19*

2.4.3 Capa limite *20*

2.4.4 Fuerzas aerodinámicas *21*

2.4.5 Coeficientes aerodinámicos *22*

2.4.6 Calidad aerodinámica *23*

2.4.7 Ángulo de ataque *24*

2.5 Túnel de viento 24

2.5.1 Clasificación *25*

2.5.2 Partes del túnel de viento *27*

2.6 Simulación Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en Ansys Fluent 29

2.6.1 Geometría *29*

2.6.2 Mallado *29*

2.6.3 Condiciones de contorno *30*

CAPITULO III 32

MATERIALES Y MÉTODOS 32

3.1 Área de estudio 32

3.2 Métodos 33

3.2.1 Diseño del modelo de túnel de viento mediante simulación CFD y apoyo de un software CAD *33*

3.2.2 Construir un prototipo de túnel de viento automatizado a partir del diseño propuesto *51*

3.2.3 Modelar un perfil NACA tipo para su correcta evaluación aerodinámica dentro del túnel de viento diseñado *52*

3.3 Materiales, equipos y software 57

CAPITULO IV 59

RESULTADOS Y DISCUSIÓN 59

4.1 Diseño del túnel de viento 59

4.1.1 Sección de pruebas *60*

4.1.2 Sección de contracción *61*

4.1.3 Difusor *63*

4.1.4 Diseño final propuesto *64*

4.2 Construcción del túnel de viento 64

4.2.1 Estructura general del sistema *64*

4.2.2 Sección de pruebas *65*

4.2.3 Sección de contracción y difusor *65*

4.2.4 Sistema de generación de viento *66*

4.3 Análisis CFD 66

4.3.1 Validación del Modelo CFD *67*

4.3.2 Generación de geometría y mallado *68*

4.3.3 Simulación CFD *68*

4.3.4 Análisis aerodinámico *84*

4.4 Análisis experimental en el túnel de viento 87

4.4.1 Ensayo de laboratorio *87*

4.4.2 Sistema de adquisición de datos *88*

4.4.3 Programación y automatización del sistema *88*

4.4.4 Procedimiento experimental y evaluación de parámetros aerodinámicos *91*

4.4.5 Procesamiento y análisis de resultados *94*

CAPITULO V 98

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 98

5.1 Conclusiones 98

5.2 Recomendaciones 100

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 102

ANEXO 1 112

ANEXO 2.....114

ANEXO 3.....114

ANEXO 4.....115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Ventajas y desventajas del túnel de viento de circuito abierto y cerrado* 26

Tabla 2 *Clasificación en base al Número de Mach* 27

Tabla 3 *Selección de la geometría de la cámara de pruebas* 33

Tabla 4 *Parámetros termodinámicos de la Universidad Técnica del Norte*.....34

Tabla 5 *Clasificación del régimen de flujo* 35

Tabla 6 *Rigurosidad de la tubería – valores de diseño* 38

Tabla 7 *Clasificación de flujos de aire en base al Número de Mach* 40

Tabla 8 *Pérdidas para tuberías en contracción*.....44

Tabla 9 *Condiciones iniciales y de contorno* 56

Tabla 10 *Condiciones de contorno* 57

Tabla 11 *Materiales, equipos y software a emplear en la investigación*.....58

Tabla 12 *Resultados de validación* 67

Tabla 13 *Calidad aerodinámica a velocidades de 3, 6 y 10 m/s* 71

Tabla 14 *Coeficientes aerodinámicos en función del ángulo de ataque*.....73

Tabla 15 *Coeficientes aerodinámicos en función de la velocidad del aire para α = 4°* 81

Tabla 16 *L y D vs ángulo de ataque*.....84

Tabla 17 *Selección de velocidad*.....92

Tabla 18 *Coeficientes aerodinámicos en función del ángulo de ataque*.....92

Tabla 19 *Coeficientes aerodinámicos en función de la velocidad del aire para α = 4°* 93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Perfil vertical del viento* 9

Figura 2 *Clasificación de aerogeneradores según su eje de rotación* 12

Figura 3 *Perfil NACA 2412* 16

Figura 4 *Perfil NACA 23012* 16

Figura 5 *Perfil NACA 65,3-218* 17

Figura 6 *Geometría del perfil alar* 17

Figura 7 *Diagrama capa limite* 20

Figura 8 *Diagrama de fuerzas aerodinámicas sobre un perfil alar* 21

Figura 9 *Formación del ángulo de ataque* 24

Figura 10 *Túnel de viento de circuito abierto* 25

Figura 11 *Túnel de viento de circuito cerrado* 26

Figura 12 *Mapa de ubicación* 32

Figura 13 *Diagrama de Moody* 39

Figura 14 *Cotas y sección de pruebas* 42

Figura 15 *Direccionadores de flujo* 45

Figura 16 *Gráfica de coeficientes de pérdidas para el difusor* 47

Figura 17 *Diagrama de flujo de la simulación en CFD* 53

Figura 18 *Sensibilidad de mallado* 54

Figura 19 *Diagrama túnel de viento* 59

Figura 20 *Diseño final propuesto* 64

Figura 21 *Estructura general del sistema* 64

Figura 22 *Sección de pruebas* 65

Figura 23 *Sección de contracción y difusor* 66

Figura 24 *Fuente de generación de viento* 66

Figura 25 *Geometría del perfil NACA 6412 2D* 68

Figura 26 *Convergencia de residuales por velocidad de análisis* 69

Figura 27 *Cl/Cd por velocidad de análisis* 70

Figura 28 *Geometría del perfil de acuerdo al ángulo de ataque* 71

Figura 29 *Comparación de residuales* 72

Figura 30 *Cl/Cd vs Ángulo de ataque* 74

Figura 31 *Análisis de velocidad a 4°* 75

Figura 32 *Análisis de presión a 4°* 75

Figura 33 *Análisis de turbulencia a 4°* 75

Figura 34 *Análisis de velocidad a 8°* 76

Figura 35 *Análisis de presión a 8°* 76

Figura 36 *Análisis de turbulencia a 8°* 76

Figura 37 *Análisis de velocidad a 12°* 77

Figura 38 *Análisis de presión a 12°* 77

Figura 39 *Análisis de turbulencia a 12°* 78

Figura 40 *Análisis de velocidad a 16°* 79

Figura 41 *Análisis de presión a 16°* 79

Figura 42 *Análisis de turbulencia a 16°* 79

Figura 43 *Cd y Cl a diferentes velocidades de viento* 80

Figura 44 *Gráfica Cl/Cd vs velocidad de viento* 81

Figura 45 *Análisis de velocidad a 4°* 82

Figura 46 *Análisis de presión a 4°* 82

Figura 47 *Análisis de turbulencia a 4°* 82

Figura 48 *Análisis de velocidad a 8°* 83

Figura 49 *Análisis de presión a 8°* 83

Figura 50 *Análisis de turbulencia a 8°* 83

Figura 51 *Calidad aerodinámica [Cl/Cd] vs ángulo de ataque* 85

Figura 52 *Calidad aerodinámica [Cd/Cl] vs ángulo de ataque* 86

Figura 53 *Calidad aerodinámica [Cd/Cl] vs velocidad de viento* 86

Figura 54 *Interfaz modo individual* 89

Figura 55 *Interfaz modo óptimo* 89

Figura 56 *Cl y Cd vs Ángulo de ataque* 93

Figura 57 *Cl y Cd vs Velocidad de viento* 94

Figura 58 *Caracterización aerodinámica experimental del perfil en función del ángulo de ataque* 95

Figura 59 *Caracterización aerodinámica experimental detallada en función del ángulo de ataque* 95

Figura 60 *Caracterización aerodinámica experimental del perfil en función de la velocidad a un ángulo de ataque óptimo* 97

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe el problema, antecedentes, justificación de la investigación y sus objetivos. De igual forma, se presentan las preguntas de investigación e hipótesis que constituyen el eje central de la investigación.

1.1 Problema de investigación

La investigación y análisis de perfiles aerodinámicos históricamente han sido de gran importancia en el campo aeronáutico, sin embargo, en los últimos años su estudio ha tenido gran influencia en el desarrollo de turbinas eólicas, tanto en su análisis computacional como experimental. Lo que hace que la utilización de energías renovables como lo es en este caso el viento sea aprovechada de mejor manera aportando positivamente a la transición energética.

Diversas investigaciones demuestran cómo cada perfil influye directamente en la eficiencia energética, rendimiento aerodinámico y costo tomando en cuenta su fin de utilización. Por ejemplo, siguiendo el estudio de Saeed et al. (2025) se comprobó que el análisis de perfiles aerodinámicos es de gran ayuda para mejorar el diseño de las hélices de un Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV) de entrega médica, ya que al hacer uso de un perfil adecuado se obtuvo estabilidad en el vuelo, maximizando su eficiencia y confiablidad. A su vez, Bolat et al. (2019) describe que al combinar tres perfiles aerodinámicos (NACA 4109, NACA 6409 y NACA 4312) con una alta relación sustentación-arrastre su eficiencia y rendimiento aumentan significativamente. En caso de la implementación el estudio de Fang et al. (2023), indica que con un buen análisis de perfiles aerodinámicos el precio puede ser menor en un rango entre 20-25% del costo total de un aerogenerador en su vida útil.

Este mismo enfoque de eficiencia aerodinámica puede ser aplicada en el área energética, donde es imprescindible estimar con exactitud cuanta energía será capaz de captar

una turbina eólica, ya que está directamente condicionada al diseño aerodinámico de sus perfiles y palas. La clave para dicho diseño está en el uso de perfiles especializados para incrementar la captura de energía y disminuir su coste energético (Chen et al., 2016). Hu et al. (2025) en su estudio señala que se debe realizar un estudio estadístico exhaustivo que es de gran importancia para el diseño de turbinas eólicas económicas y confiables, debido a las incertidumbres que están asociadas a los perfiles aerodinámicos y sus parámetros como el coeficiente de arrastre (Cd) y sustentación (Cl).

Además, en el trabajo de Chen et al. (2016) se menciona que para poder predecir con exactitud la captura de energía por parte de las turbinas eólicas, es indispensable un buen diseño aerodinámico de sus perfiles y palas, por lo que el uso de perfiles que maximicen tanto la eficiencia como el rendimiento de las palas y al mismo tiempo reduzcan el coste económico es de vital importancia. Sin embargo, obtener la máxima eficiencia en las turbinas eólicas es un gran desafío debido a que en algunos casos la potencia que indica el fabricante de la turbina no coincide con la potencia real que se obtiene de la misma, ya sea por un diseño ineficiente, pérdidas operativas o cambios en las características del viento, como la velocidad y las ráfagas de viento (Arumugam et al., 2021).

En base a lo mencionado en los párrafos anteriores, se debe considerar el uso de un software (Rayhan et al., 2024) que incluya técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) que nos permita analizar detalladamente el comportamiento de un fluido, en este caso aire, llevándonos a realizar una experimentación más directa y de esta manera se puedan tomar decisiones acertadas a la hora de diseñar una turbina eólica. Sin embargo, la medición de las variables de interés como la aerodinámica del álabe, el perfil de velocidades, distribución de presiones, las características de la capa límite y su grado de turbulencia, conllevan grandes desafíos técnicos (Cáceres, 2021). Ante esta problemática se hace presente la necesidad de desarrollar equipos adecuados para las experimentaciones, como un túnel de viento

automatizado que nos permita controlar y medir de manera más acertada las variables antes mencionadas. De este modo, con la combinación de simulaciones utilizando un software especializado y experimentaciones físicas, se permitirá estudiar a detalle parámetros técnicos y validar correctamente los perfiles aerodinámicos.

Por lo tanto, la implementación de un túnel de viento automatizado para realizar análisis aerodinámicos de perfiles eólicos en ambientes de educación superior se vuelve indispensable para que los estudiantes se permitan interactuar con sistemas reales contribuyendo en gran medida con su formación profesional y combinando la comprensión de los conceptos teóricos con su aplicación práctica, con lo que se contribuye a obtener una experiencia de aprendizaje más completa y eficaz.

1.2 Justificación

La adopción de energías renovables es indispensable para la transición energética dentro del país y a su vez para satisfacer la demanda que cada día sigue en aumento. Con el fin de lograrlo, este Trabajo de Integración Curricular (TIC), se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), con especial énfasis en el número 7 (Energía asequible y no contaminante) debido a que da paso al estudio de la energía eólica, en especial permitiendo tanto la evaluación como optimización de perfiles aerodinámicos lo cual es crucial para mejorar la eficiencia de una turbina eólica, contribuyendo a la reducción de costos y promoviendo el acceso a energía limpia; y el número 13 (Acción por el clima) dado que impulsa el uso de tecnologías innovadoras y renovables que ayudan a mitigar la dependencia de combustibles fósiles y reducir emisiones de CO_2 mediante la investigación e implementación de infraestructura sostenible.

Dada su importancia, varios estudios han analizado perfiles NACA para la producción de energía eólica mediante aerogeneradores. Por ejemplo, Hernández et al. (2021) en su estudio evalúa tres perfiles NACA (0018, 0021 y 6412) con el objetivo de seleccionar el más adecuado

para generar energía eólica a partir de aerogeneradores de eje vertical (VAWT) de baja potencia aplicables en sectores urbanos, teniendo como resultado que el más adecuado luego de la simulación en los softwares SolidWorks e Inventor es el perfil NACA 6412 dada su disipación de turbulencias, adecuado para este tipo de aplicaciones. A su vez, en la investigación de Pérez (2019) se analiza otro perfil, el NACA 0020, mediante el desarrollo de un modelo geométrico en el software Gambit y un modelo numérico en el software Ansys-Fluent demostrando que este perfil ofrece una estabilidad operativa, pero con pérdidas de eficiencia en situaciones de alta turbulencia, sin embargo, para validar estos resultados se recomendó una evaluación aerodinámica en túneles de viento.

En el trabajo de Casa (2023) para el sector de Quito-Ecuador se diseña y construye un prototipo de túnel de viento mediante el CAD Inventor, para luego simular y analizar la comprensión del flujo dentro del túnel con la herramienta Ansys-Fluent tomando en cuenta las condiciones del sector (altura de Quito: 2850 [msnm], densidad: 0.832 [Kg/m^3] viscosidad: 2.13 x 10^{-5} [$kg/m*s$] y presión Atm de 71440 [Pa]). Maldonado & Calle (2023) desarrollaron un túnel de viento con fines pedagógicos mediante la utilización simultanea de CAD/CFD, SolidWorks y SolidWorks Flow Simulation respectivamente, para la Universidad Politécnica Salesiana (UPS), Sede Guayaquil, tomando en cuenta las condiciones del sector, en especial la presión atmosférica, que oscila entre 1010 milibares [mbares]. Asimismo, Guachamín (2024) en su trabajo de integración curricular, diseña un túnel de viento de circuito abierto a baja velocidad (25 m/s) para una posible implementación en la Escuela Politécnica Nacional (EPN), para el estudio de los perfiles NACA 63A418 y 64A010, usando el software Inventor para su modelado 3D. Por otro lado, Mera (2025) dimensiona un túnel de viento cerrado mediante el mismo software y aplicación de CFD para la ciudad de Riobamba-Ecuador, que al contar con una presión atmosférica de 72324,96 [Pa] y densidad del aire de 0,881 [kg/m^3] a una latitud de 2754 [msnm] y temperatura de 13 [°C], se definió que el tipo de túnel adecuado

es el subsónico al obtener un número de Mach de 0,06, lo que lo hace ideal para estudios aerodinámicos.

La utilización de este tipo de herramientas a escala permite simular de manera más fiable las condiciones a las que estará sometido un modelo real, sin invertir gran cantidad de dinero en dispositivos a escala real y teniendo acceso a un gran número de iteraciones (D. Figueroa, 2022). Ayudando a la comprensión de ciertos parámetros que son teóricamente difíciles de explicar cómo los coeficientes aerodinámicos, número de Reynolds, turbulencias y distribución de presiones (Mayoral, 2021). Tal como lo realizó Arsuaga (2023) en su estudio, en el cual para analizar el perfil NACA 6716 utilizó un túnel de viento subsónico no-normalizado para la evaluación de dichos parámetros.

En esta investigación se propone la construcción e implementación de un prototipo de túnel de viento automatizado utilizando el software de CAD SolidWorks para su modelado 3D y como herramienta de CFD el software Ansys-Fluent, para la ciudad de Ibarra-Ecuador con estas condiciones: altitud de 2208 [$msnm$], temperatura de 16.82 [$°C$], densidad de 0.936 [Kg/m^3], viscosidad dinámica de 1.71972 x 10^{-5} [$kg/m*s$] y presión Atm de 77.47 [kPa].

En este trabajo, el prototipo de túnel de viento surge como una respuesta a garantizar el acceso a una energía segura, sostenible y asequible como lo es la energía eólica de manera duradera y eficiente. Sin embargo, al no tener un desarrollo tan presente dentro del país para este tipo de energía es necesario realizar estudios en este campo. El túnel de viento es un dispositivo esencial para comprender los parámetros aerodinámicos: coeficiente de arrastre y sustentación, que se presentan en el análisis de perfiles aerodinámicos en aerogeneradores tanto de eje vertical como de eje horizontal.

Conocer a fondo el comportamiento de estos dos parámetros es clave para el diseño de las palas ya que determinan su eficiencia energética, estabilidad y rendimiento frente a diferentes condiciones de viento. Por este motivo, la implementación de estos equipos en la

Universidad Técnica del Norte (UTN) es de gran importancia, ya que facilita el estudio de fenómenos aerodinámicos con experimentaciones en físico dentro de los laboratorios y a su vez impulsa la investigación aplicada en proyectos de titulación y estudios de caso en los estudiantes, obteniendo un acercamiento más profesional dentro del área laboral.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Construir un prototipo de túnel de viento automatizado para la evaluación aerodinámica de perfiles eólicos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar el modelo de túnel de viento mediante simulación CFD y apoyo de un software CAD.
- Construir un prototipo de túnel de viento automatizado a partir del diseño propuesto.
- Modelar un perfil NACA tipo para su correcta evaluación aerodinámica dentro del túnel de viento diseñado.

1.4 Pregunta de Investigación

¿Qué diseño de túnel de viento produce la mejor combinación de parámetros aerodinámicos?

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis Nula (Ho)

La variación de parámetros aerodinámicos en el túnel automatizado no incide significativamente en el rendimiento aerodinámico de perfiles NACA.

1.5.2 Hipótesis Alternativa (Ha)

La variación de parámetros aerodinámicos en el túnel automatizado incide significativamente en el rendimiento aerodinámico de perfiles NACA.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Recurso eólico

En la tendencia por aumentar la generación de energía a partir de fuentes no convencionales como el sol, aire, agua, geotermia y biomasa; la tecnología con mayor madurez, viabilidad económica y capacidad de implementación a gran escala dentro de los sistemas eléctricos, es la energía eólica (Mayorga et al., 2019). Debido a esto, la energía eólica se ha consolidado como una de las mejores alterativas renovables para satisfacer la creciente demanda global. En 2022 la capacidad eólica global instalada fue mayor a 900 GW, con perspectivas de agregar otros 500 GW antes de 2030 (Bayona et al., 2025). No obstante, la naturaleza variable del viento y la incertidumbre en su pronóstico hacen que su generación sea difícil de gestionar en comparación a la generación síncrona convencional, dificultando de cierta manera su incorporación en un sistema eléctrico de potencia (Ochoa, 2019).

2.1.1 Velocidad de viento

Es el factor más influyente en el aprovechamiento de la energía eólica, ya que la potencia disponible en el viento es proporcional a la velocidad elevada al cubo, convirtiéndola en una variable clave para caracterizar el recurso eólico y elegir los sitios de instalación de aerogeneradores (Rao, 2019). La velocidad de viento, medida generalmente en metros por segundo [m/s] o kilómetros por hora [km/h], permite identificar las condiciones de operación segura de una turbina eólica, siendo indispensable en los análisis de eficiencia y en la elaboración de las curvas de potencia de los aerogeneradores. (N. Martínez et al., 2022)

2.1.2 Variabilidad de la velocidad de viento

El viento se genera a partir del calentamiento desigual de la atmosfera terrestre, y se estima que el 2% de la radiación solar que proviene del sol se transforma en energía eólica (Castro, 2018). Como resultado de este proceso, la velocidad de viento varia a cuatro diferentes

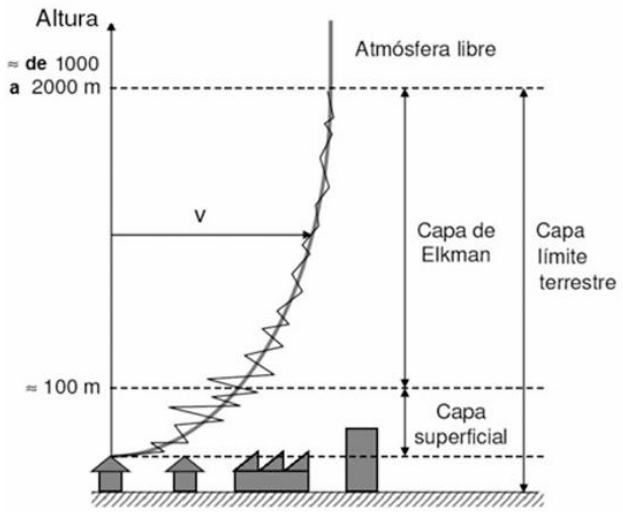
escalas: a escala global, dependiendo del calentamiento desigual de la Tierra y la fuerza de Coriolis; a meso-escala, la velocidad es mayor durante el día debido a diferencias térmicas; a microescala es de gran importancia dentro del diseño de parques eólicos ya que las variaciones son por pequeños obstáculos, colinas, cerros, etc.; a corto plazo, fluctúa constantemente por obstáculos, condiciones climáticas y de la superficie, compensándose parcialmente por la inercia del rotor del aerogenerador en la producción de energía y en escalas diurnas (día y noche), alcanza valores superiores durante el día con más turbulencias, coincidiendo favorablemente con las horas de mayor demanda energética (Ochoa, 2019).

2.1.3 Perfil vertical de la velocidad de viento

El perfil vertical del viento se determinó usando la Ley Exponencial de Hellman, que permite describir como varia la velocidad del viento a mayores alturas que la del instrumento de medición. Esta ley se basa en investigaciones previas que permiten estimar el coeficiente α asociado al tipo de superficie, dando una referencia del nivel de rugosidad del terreno (exponente de Hellman) (G. González et al., 2025). Según Villarrubia (2013), la variación de la velocidad de viento con la altura surge por las turbulencias mecánicas, que son irregularidades del terreno como el relieve, obstáculos y rugosidad, y las turbulencias térmicas que se dan por el gradiente vertical de temperatura que genera movimientos convectivos ascendentes. En teoría, justo en la superficie la velocidad de viento es 0 y mientras va aumentando la altura, la influencia del rozamiento disminuye haciendo que la velocidad se incremente (figura 1). Este cambio progresivo forma un gradiente de velocidad con respecto a la altura conocido como perfil vertical del viento.

Figura 1

Perfil vertical del viento



Nota. Obtenido del libro "Ingeniería de la Energía Eólica" de Villarrubia (2013).

2.1.4 Rugosidad

El gradiente de velocidad del viento cerca de la superficie del suelo depende directamente de la rugosidad del terrero, la cual puede extenderse afectando el desempeño de los aerogeneradores. En superficies lisas generan un suave aumento en la velocidad de viento mientras que rugosas tienen un gradiente más brusco (Villarrubia, 2013).

2.1.5 Condiciones climáticas

2.1.5.1 Presión atmosférica y temperatura

Las variaciones espaciales de temperatura en la superficie terrestre generan cambios en el campo de presión atmosférica, provocando que el aire se desplace desde zonas de alta hacia baja presión. Aunque existe un gradiente de presión vertical, este se compensa casi por completo con la fuerza gravitacional, por lo que los vientos se desarrollan principalmente en el plano horizontal. Además del gradiente de presión, factores como la inercia del aire, la rotación de la Tierra y la fricción con la superficie, que induce turbulencia, influyen en el comportamiento del viento. Asimismo, la temperatura afecta directamente la densidad del aire: a mayor temperatura, la densidad disminuye; y a menor temperatura, aumenta. Esto es

relevante para el recurso eólico, ya que la potencia disponible depende de dicha densidad. A su vez, la presión disminuye al aumentar la altitud, lo que reduce la densidad del aire, por lo que en zonas elevadas se requieren análisis para corregir pérdidas de potencia por densidad (Manwell et al., 2010).

2.1.5.2 Densidad del aire

Es un factor importante a la hora de determinar el potencial eólico de un lugar, para un aire frio la densidad de potencia es superior a uno más caliente, de la misma forma, un lugar situado a nivel del mar tiene una densidad de potencia mayor a un lugar de mayor altitud, dado que la densidad del aire disminuye con la altura (Burgos et al., 2015). Se calcula con la ecuación 1:

$$\rho = 1.225 \left(\frac{288}{T + 273.15}\right) e^{-\left(\frac{h}{8435}\right)} \qquad \textbf{(Ec. 1)}$$

Donde:

- ρ: densidad del aire [kg/m^3]
- T: temperatura del lugar [°C]
- h: altura sobre el nivel del mar [msnm]

2.1.6 Turbulencia

Dentro de la dinámica de fluidos, el flujo laminar se caracteriza por trayectorias constantes de las partículas del fluido, por el contrario, un movimiento intensamente desordenado dado por velocidades altas caracterizado por las fluctuaciones de las mismas, se llama flujo turbulento. Este favorece una mezcla eficiente de masa, cantidad de movimiento y energía, además de ser un disipador de energía. favorece una mezcla eficiente de masa, cantidad de movimiento y energía, además de ser un importante mecanismo de disipación energética. Entonces, la turbulencia vendría a ser un efecto implícito en la velocidad de viento y puede

definirse como la variabilidad a lo largo del tiempo con respecto a una velocidad media (Castaño, 2023a).

2.1.7 Densidad de potencia

La densidad de potencia eólica (Pw/A) es el indicador más significativo para el viento que describe la cantidad de energía producida por diferentes velocidades del viento en un sitio seleccionado. Tanto los datos reales de la velocidad del viento medidos en un sitio como el análisis de distribución de Weibull se pueden usar para calcular la Pw/A del viento (Yancachajlla & Vilca, 2022).

2.1.8 Limite de Betz

Dado que la potencia disponible en el viento no coincide con la que un generador puede aprovechar, en 1920, el alemán Albert Betz determino que la eficiencia máxima alcanzable por un aerogenerador es hasta 16/27 (0.593). Es decir, que solo puede captar un 59% de la energía del viento, este es conocido como límite de Betz y hasta la actualidad es un valor que ninguna turbina eólica puede superar (Pabón et al., 2019), debido a las fluctuaciones de corriente y tensión que se dan por la variabilidad de la velocidad de viento (García, 2023).

2.1.9 Potencia aprovechable

Es la potencia aprovechada por el rotor de la eólica. Es decir, la potencia útil en el eje del rotor eólico que acciona la caja multiplicadora (gear box). Se determina a través de la ecuación 2 (Villarrubia, 2013).

$$P = \frac{1}{2}\rho A V^3 Cp \qquad \textbf{(Ec. 2)}$$

Donde:

- P: potencia aprovechable [W]
- ρ: densidad del aire [kg/m^3]
- A: área de barrido [m^2]
- V: velocidad de viento [m/s]

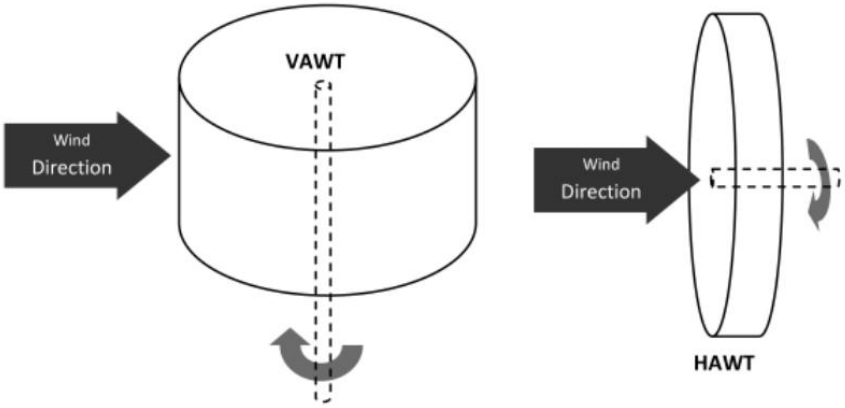
- Cp: coeficiente de potencia

2.2 Aerogeneradores

Los aerogeneradores son maquinas capaces de convertir la energía cinética del viento en energía mecánica y posteriormente en eléctrica, principalmente mediante el rotor y el generador. El rotor, compuesto por el buje y los álabes, gira al recibir el viento, y esta rotación se transmite y ajusta de acuerdo a las revoluciones por minuto requeridas a través del sistema de transmisión, que incluye el cojinete principal, la caja de engranajes y los ejes de alta y baja velocidad (Rao, 2019). Los aerogeneradores se clasifican en dos categorías de acuerdo a su eje de rotación: turbinas eólicas de eje horizontal (HAWT) y turbinas de eje vertical (VAWT) como se observa en la figura 2 (Adaramola, 2014).

Figura 2

Clasificación de aerogeneradores según su eje de rotación



Nota. Obtenido del libro "Wind Turbine Technology Principles and Design" de Adaramola (2014).

Estos dos tipos de turbinas son las principales tecnologías para la extracción de energía eólica, cuyo desarrollo e innovación han reflejado un crecimiento exponencial, evidenciando avances significativos en rendimiento y eficiencia.

2.2.1 Turbinas de eje horizontal (HAWT)

Dada su alta eficiencia en la conversión de energía eólica y modelos de comercialización bien desarrollados, las HAWT se han establecido como la tecnología dominante en el aprovechamiento de la energía del viento (Yang et al., 2025). Por lo tanto, son empleadas para aplicaciones comerciales a gran escala (Ghorbanpoor et al., 2024), ya que su eficiencia depende directamente de las condiciones del viento, las cuales varían según la geografía, terreno y topografía de cada lugar, la elección adecuada del sitio es fundamental para reducir estas variaciones. Por ello, suelen preferirse las áreas costeras y rurales, donde la amplitud permite distribuir los aerogeneradores espaciadamente facilitando el control del parque eólico (Vadhyar et al., 2024). Además, dado que estas turbinas requieren alineación con la dirección del viento, se pueden incorporar sistemas de orientación que mantengan esta alineación de forma óptima, pero pueden resultar complejos y costosos.

A su vez, el número, tamaño y geometría de las palas genera un impacto en el rendimiento, el área de barrido, peso, costo y nivel de ruido de la turbina, optando así por usar habitualmente aerogeneradores de tres palas (Trauernicht et al., 2024). Las HAWT se clasifican según su potencia en cuatro categorías: las microturbinas (<3 kW) usadas en sistemas aislados para carga de baterías; las pequeñas (<50 kW) que cubren mayores demandas y pueden integrarse en sistemas híbridos como para la iluminación de granjas; los grandes (<850 kW) que inyectan energía a la red, cuentan con tres palas y sistemas de regulación de potencia, comunes en parques eólicos con terrenos complejos y los multimegawat (1-3 MW), similares a los grandes pero con diámetros y alturas de hasta 100 m, utilizados en parques eólicos offshore (Canizales & Tercero, 2020). Es decir, mientras más altura tenga la turbina, más aumentara la velocidad del viento generando mayor potencia.

2.2.2 Turbinas de eje vertical (VAWT)

Esta tecnología ha tomado relevancia en la actualidad debido a que la diversificación de la matriz energética y la creciente demanda de generación distribuida han enfatizado en tecnologías más adaptables y flexibles a entornos complejos y cambiantes, especialmente en zonas urbanas o periurbanas (alrededor de la ciudad) (Palacios & Ayala, 2023). Estas turbinas están diseñadas para captar la energía del viento sin importar su dirección, a diferencia de las HAWT que pueden presentar desgaste frente a vientos turbulentos, estas aprovechan dichas condiciones haciéndolas adecuadas para las zonas residenciales. Asimismo, no necesitan soportes robustos para la caja de cambios, generador y demás componentes, simplificando la sustitución de piezas y disminuyendo costos de mantenimiento (Naseem et al., 2020) dado que su estructura donde se encuentra el eje de rotación se encuentra de manera perpendicular al suelo (Diago, 2019).

Las VAWT también destacan por su diseño sencillo, capacidad omnidireccional y bajo nivel de ruido, sin embargo, su producción energética sigue siendo menor que las HAWT (Javaid & Hassan, 2024). Debido a esta principal desventaja no tiene tanta demanda en estas zonas a comparación de otras tecnologías (Desnous, 2022). Aun así, facilitan su incorporación al mercado de equipos para generación eléctrica y su instalación en regiones urbanas orientados a la microgeneración y generación distribuida y a pesar de que tiene fundamentos ya consolidados la investigación actual busca ampliar su rango de aplicaciones mediante varios tipos de generadores, con el afán de acercar su eficiencia a límite de Betz (Alave et al., 2022). Dentro de las turbinas de eje vertical solo existen tres tipos base: Savonius, Darrieus y Tipo H o Giromill, el resto de VAWTs son variaciones de estas 3 (Santiago, 2024).

2.3 Perfiles aerodinámicos

Los perfiles aerodinámicos han evolucionado conforme avanza la investigación aeronáutica, dando lugar a varias familias con características únicas, entre estas destacan los

perfiles PARSEC, Clark Y, Gottingen y NACA. Los perfiles PARSEC son generados mediante polinomios definidos por once parámetros, permitiendo controlar la forma del extradós e intradós y creando varias geometrías sin depender de una forma base (J. Rodríguez & Espejo, 2019). Por otro lado, el perfil Clark Y ha logrado gran aceptación por sus cualidades aerodinámicas, como la generación de alta sustentación a bajas velocidades y su intradós plano, lo que facilita su construcción y medición de ángulos (Ganiele et al., 2021). Finalmente, los perfiles Göttingen, quienes constituyen una de las primeras generaciones modernas marcando un avance crucial en el diseño aerodinámico para el posterior desarrollo de los perfiles NACA, con quienes comparten cierta metodología pese a que su geometría original no este definida explícitamente (K. Palacios & Santa, 2023).

El perfil aerodinámico es la "forma del área transversal de un cuerpo que, al desplazarse a través de un fluido, es capaz de crear una distribución de presiones a su alrededor" formando fuerzas de sustentación y arrastre. Estos perfiles fueron analizados por NACA (National Advisory Commitee for Aeronautics), desarrollando una serie de perfiles de 4, 5 y 6 dígitos los cuales son utilizados hasta la actualidad (O. López, 2021). Se clasifican en simétricos y asimétricos: un perfil simétrico tiene el extradós e intradós idénticos, con una línea recta (sin curvatura) que va desde el borde de ataque hasta el borde de salida, haciéndolos económicos y fácil de fabricar; mientras que un perfil asimétrico presenta una línea de curvatura, lo que hace que el extradós e intradós sean diferentes, permitiendo generar mayor sustentación y mejor estabilidad al acercarse a condiciones críticas de vuelo, como un alto ángulo de ataque (Valdez et al., 2018).

2.3.1 Serie de perfiles NACA

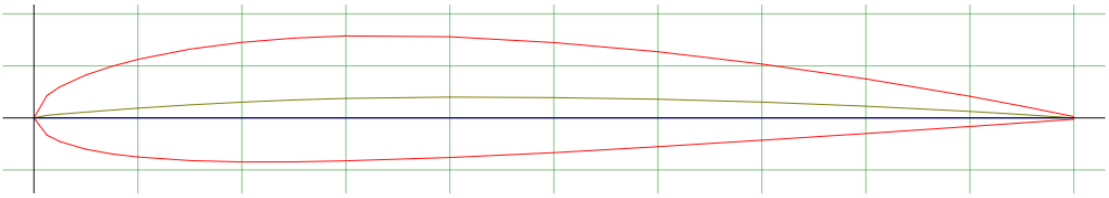
2.3.1.1 NACA 4 Dígitos

Fue la primera serie de perfiles NACA desarrollada a inicios de 1930. El primer dígito especifica la curvatura máxima expresada en centésimas de la línea de cuerda; el segundo dígito

indica la posición de esa curvatura máxima medida desde el borde de ataque en decimas de la cuerda; y los últimos dos dígitos equivalen el espesor máximo en centésimas de la cuerda. Por ejemplo, el perfil NACA 2412 de la figura 3 tiene una curvatura máxima de 0.02c, ubicada a 0.4c desde el borde de ataque y un espesor máximo de 0.12c (J. Anderson, 2017).

Figura 3

Perfil NACA 2412



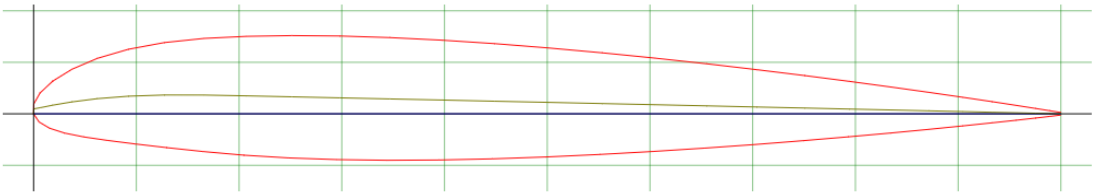
Nota. Obtenido de la página web "Airfoil Tools"

2.3.1.2 NACA 5 Dígitos

A mediados de 1930 surgió la segunda serie de perfiles NACA, estos mantienen la misma distribución de espesor de la de 4 dígitos, pero añadiendo una nueva línea media, ya que la serie anterior no permitía ubicar la curvatura máxima en posiciones muy adelantadas, contribuyendo al incremento de sustentación. Por eso, en el perfil NACA 23012 de la figura 4, el primer digito se multiplica por 3/2 y se obtiene el Cl de diseño en décimas; los dos siguientes se dividen para 2 indicando la posición de la máxima curvatura en centésimas de cuerda desde el borde de ataque y los últimos dos dígitos representan el espesor máximo (Anderson, 2016).

Figura 4

Perfil NACA 23012



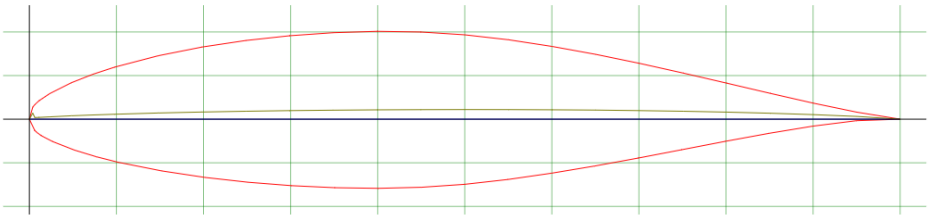
Nota. Obtenido de la página web "Airfoil Tools"

2.3.1.3 NACA 6 Dígitos

Una de las familias más populares que se desarrolló durante la Segunda Guerra Mundial, el primer digito indica que pertenece a la esta serie de 6 dígitos; el segundo nos dice dónde está la presión mínima en decimas de cuerda desde el borde de ataque (cuando el perfil simétrico básico tiene sustentación cero); el tercero es el coeficiente de sustentación de diseño en decimas y los dos últimos dígitos representan el espesor máximo en centésimas de cuerda, entonces, siguiendo el perfil NACA 65,3-218 de la figura 5, el 6 significa que es de la serie 6, la presión mínima está en 0.5c del perfil simétrico básico sin sustentación, el coeficiente de sustentación es 0.2 y el perfil tiene un espesor de 18% (Abbott & Von, 1949).

Figura 5

Perfil NACA 65,3-218



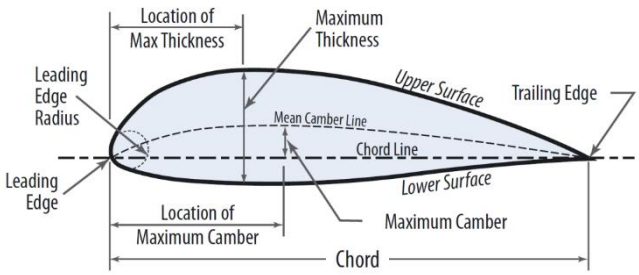
Nota. Obtenido de la página web "Airfoil Tools"

2.3.2 Partes de un perfil aerodinámico

Para comprender de mejor manera como está formado un perfil aerodinámico, es esencial identificar los elementos y parámetros que lo definen. En la figura 6 se puede ver detalladamente su geometría:

Figura 6

Geometría del perfil alar



Nota. Obtenido de Fernández (2021)

2.3.2.1 Línea de Cuerda (Chord Line)

Distancia entre el punto máximo del borde de ataque (Leading Edge), es decir, el punto donde incide el aire; y el borde de salida (Trailing Edge), donde el flujo se vuelve a encontrar (Noriega, 2021).

2.3.2.2 Radio del Borde de Ataque (Leading Edge Radius)

Se obtiene ubicando el centro de un círculo sobre la línea de la cuerda, este radio corresponde al círculo que toca simultáneamente el intradós y el extradós en la región del borde de ataque (Martínez, 2022).

2.3.2.3 Línea de Curvatura Media (Mean Camber Line)

Línea equidistante entre el extradós e intradós del perfil, que va desde el borde de ataque hasta el borde de salida, definiendo la curvatura del perfil alar (Tejada, 2020).

2.3.2.4 Extradós (Upper Surface)

Superficie superior del perfil, donde la velocidad del flujo es alta y genera zonas de baja presión (Suárez, 2024).

2.3.2.5 Intradós (Lower Surface)

Superficie inferior del perfil, donde la velocidad del flujo es baja y con presión elevada (Suárez, 2024).

2.3.2.6 Espesor Máximo (Maximun Thickness)

Distancia máxima tomada de forma perpendicular a la cuerda entre el intradós y el extradós (Rico, 2020).

2.3.2.7 Curvatura Máxima (Maximum Camber)

Distancia máxima entre la línea de curvatura media y la línea de cuerda, indicando que tan pronunciada es la curvatura del perfil (Anderson, 2017).

2.4 Aerodinámica

2.4.1 Número de Reynolds

Cantidad adimensional que predice el tipo de flujo que experimentara un fluido alrededor de un objeto o en el interior de un conducto, permitiéndonos saber si un flujo es laminar, turbulento o transicional (Centeno, 2021). Definiéndose como la relación entre las fuerzas inerciales y fuerzas viscosas en el flujo (Bianchi, 2024). Dichos flujos se determinan mediante el cálculo del número de Reynolds (ecuación 3) (White, 2004):

$$Re = \frac{\rho * v_s * D}{\mu} \qquad \textbf{(Ec. 3)}$$

Donde:

- Re: número de Reynolds
- ρ: densidad del fluido [kg/m^3]
- $v_{s:}$ velocidad del flujo [m/s]
- D: longitud característica del fluido o diámetro del tubo por el que circula [m]
- μ: viscosidad del fluido [$Pa \cdot s$] o [kg/m*s]

2.4.2 Número de Mach

Otro parámetro adimensional indispensable para un túnel de viento es el número de Mach, que relaciona la velocidad del flujo (aire) con la velocidad del sonido, comprobando la comprensibilidad del aire al pasar por el túnel de viento (Topa, 2017). Se lo calcula con la ecuación 4 (White, 2004):

$$M = \frac{v}{v_s} \qquad \textbf{(Ec. 4)}$$

Donde:

- M: número de Mach
- v: velocidad del flujo [m/s]
- v_s: velocidad del sonido [m/s]

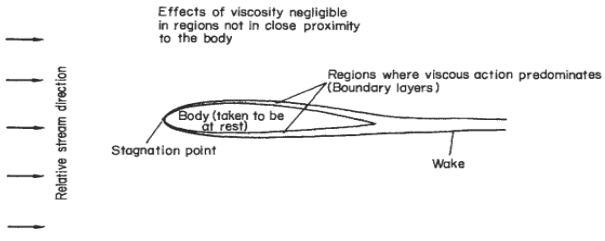
En la experimentación lograr un mismo número de Reynolds y número de Mach como en la realidad es poco probable, por lo que se opta por respetar el número de Reynolds dada su importancia en ensayos aerodinámicos de aerogeneradores, por su determinación de efectos viscosos (flujo laminar o turbulento) (J. C. García, 2023). Debido a esto para el diseño en 3D de un túnel de viento para pruebas aerodinámicas se utiliza el software CAD SolidWorks, que sirve para el modelado del prototipo y con la herramienta de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), SolidWorks Flow Simulation, integrada en el mismo, se realiza la simulación aerodinámica (Cascante, 2019).

2.4.3 Capa limite

De acuerdo a Houghton & Carpenter (2003) y Abbott & Von (1949), es la delgada región de flujo que se forma sobre la superficie de un cuerpo cuando un fluido se desplaza a su alrededor, en donde los efectos de la viscosidad son dominantes, como se observa en la figura 7. En esta zona, la velocidad del fluido pasa de cero por la condición de no deslizamiento a aumentar gradualmente hasta alcanzar la del flujo libre. Puede comportarse de forma laminar y turbulenta (flujo con remolinos que genera mayor fricción). Estas características influyen en la separación del flujo, sustentación, arrastre y eficiencia del perfil, por lo cual, es fundamental comprender como evoluciona la capa limite ya que pequeñas variaciones pueden mejorar o disminuir el rendimiento de cualquier cuerpo expuesto al flujo.

Figura 7

Diagrama capa limite



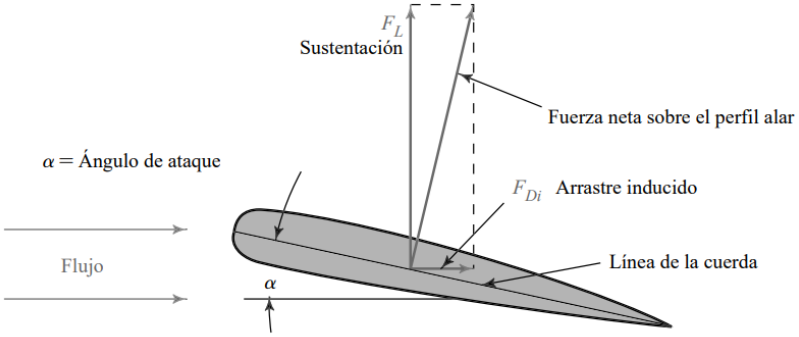
Nota. Obtenido del libro “Aerodynamics for Engineering Students” de Houghton & Carpenter (2003)

2.4.4 Fuerzas aerodinámicas

Streeter et al. (2000) en su libro "Mecánica de Fluidos" menciona que el flujo que circula alrededor de un perfil alar da paso a dos fuerzas aerodinámicas: la de sustentación, que actúa perpendicular a la dirección del flujo y la de arrastre que actúa en sentido opuesto al flujo del aire, como se puede ver en la figura 8. Este tipo de fuerzas surgen debido a la diferencia de velocidad y presión entre la parte superior e inferior del perfil, así como por los esfuerzos cortantes que se desarrollan en la superficie. El gradiente de presión resultante es el que produce la sustentación, mientras que el arrastre proviene tanto de estas variaciones de presión como de los esfuerzos cortantes que ejerce el flujo de aire sobre el perfil (Bergadà, 2012).

Figura 8

Diagrama de fuerzas aerodinámicas sobre un perfil alar



Nota. Obtenido del libro de Mott & Untener (2015) "Mecánica de Fluidos"

Las fuerzas de sustentación y arrastre se calculan con las ecuaciones 5 y 6 respectivamente (Hurt, 1965):

$$L = C_L * q * S \qquad \textbf{(Ec. 5)}$$

Donde:

- L: fuerza de sustentación [N]
- C_L: coeficiente de sustentación
- q: presión dinámica [Pa]
- S: área de la superficie del ala [m^2]

$$D = C_D * q * S \qquad \textbf{(Ec. 6)}$$

Donde:

- D: fuerza de arrastre [N]
- C_D: coeficiente de arrastre
- q: presión dinámica [Pa]
- S: área de la superficie del ala o área de referencia [m^2]

2.4.5 Coeficientes aerodinámicos

2.4.5.1 Coeficiente de sustentación (Cl)

De acuerdo a la ecuación 7, la cual es una de las relaciones más importantes en aerodinámica aplicada, al invertirla se puede utilizar como definición del coeficiente de sustentación. Así, este se define como la fuerza de sustentación dividida por la presión dinámica y un área de referencia (J. D. Anderson, 2016), tal como se observa en la ecuación 5:

$$Cl = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \qquad \textbf{(Ec. 7)}$$

Donde:

- Cl: coeficiente de sustentación
- L: fuerza de sustentación [N]
- ρ: densidad del aire [kg/m^3]
- V: velocidad de viento [m/s]
- S: área de referencia del perfil [m^2]

El coeficiente de sustentación depende del ángulo de ataque, el número de Mach y el número de Reynolds. En específico, va incrementándose de forma lineal aproximadamente 0.1% por cada grado del ángulo de ataque, hasta que llega a un límite tras el cual comienza a disminuir causando perdida de sustentación y entrando a perdida aerodinámica. Además, su

valor también se ve influenciado por el perfil alar, condiciones de superficie y la capa limite (Hitchens, 2015).

2.4.5.2 Coeficiente de arrastre (Cd)

De acuerdo con la ecuación 8, este se define como la fuerza de arrastre dividida por la presión dinámica y un área de referencia. Y al igual que el coeficiente de sustentación, es un valor adimensional que depende del ángulo de ataque, el número de Mach y el número de Reynolds, pero este caracteriza la resistencia aerodinámica de un cuerpo en función de su geometría y orientación respecto al flujo (Mott & Untener, 2015).

$$Cd = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \qquad \textbf{(Ec. 8)}$$

Donde:

- Cd: coeficiente de arrastre
- L: fuerza de arrastre
- ρ: densidad del aire [kg/m^3]
- V: velocidad de viento [m/s]
- S: área de referencia del perfil [m^2]

2.4.6 Calidad aerodinámica

La configuración y aplicación de todo perfil aerodinámico está relacionado directamente con la relación arrastre/sustentación, como se indica en la ecuación 9, ya que muchos parámetros importantes del rendimiento aerodinámico de cada uno se obtienen cuando esta calidad alcanza un valor máximo. Las condiciones de rendimiento de esta relación determinan la eficiencia aerodinámica del perfil, maximizando la sustentación y minimizando la resistencia, lo que es indispensable para el diseño y selección del perfil según su aplicación (Bertin & Cummings, 2009).

$$\varepsilon = \frac{Cd}{Cl} \qquad \textbf{(Ec. 9)}$$

Donde:

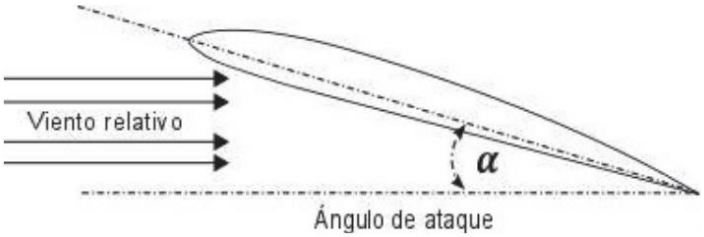
- ε: calidad aerodinámica del perfil

2.4.7 Ángulo de ataque

Es el ángulo "α" formado entre la línea de la cuerda y la dirección del flujo de aire que llega al perfil como se ve en la figura 9. Es un parámetro muy importante, ya que cuando el ángulo aumenta demasiado se generan vórtices más turbulentos detrás del perfil, disminuyendo la eficiencia aerodinámica del perfil (Cubillos, 2019).

Figura 9

Formación del ángulo de ataque



Nota. Obtenido de Yalama (2017)

2.5 Túnel de viento

Un túnel de viento es un instrumento experimental de investigación ampliamente utilizado en aerodinámica para estudiar el comportamiento de diversos objetos bajo influencia de flujos de aire controlados simulando condiciones reales de trabajo (Más, 2022). Su principio de funcionamiento es generar un flujo de aire controlado y adaptable para simular condiciones específicas de operación y evaluar el comportamiento aerodinámico de varios objetos frente al viento. Los túneles de viento de la actualidad pueden simular varias condiciones de viento (velocidad y dirección de viento), contando con instrumentación avanzada para medición de fuerzas y presiones aerodinámicas, siendo útil en diversos campos de investigación (Benavides, 2025).

2.5.1 Clasificación

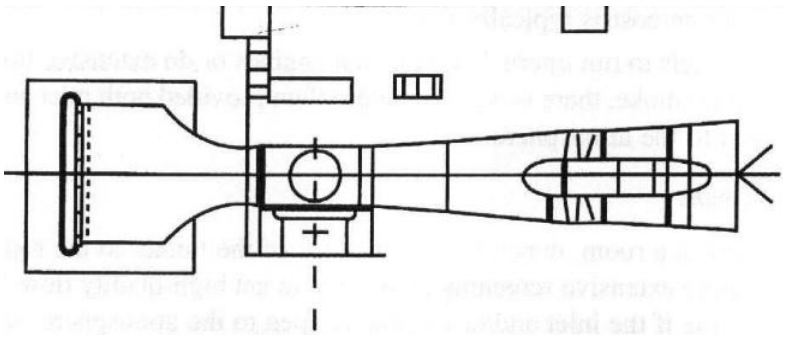
Se clasifican de acuerdo a su tipología física (tipo de instalaciones) y operacional (velocidad de operación) (Casa, 2023).

2.5.1.1 Tipología Física (Tipo de retorno)

- Túnel de circuito abierto. – El flujo de aire que circula en este túnel sigue una trayectoria recta, ingresando desde el exterior por la sección de entrada donde se coloca el direccionador de flujo para luego atravesar la sección de pruebas y nuevamente ser enviado a la atmosfera pasando por el difusor (figura 10) (Balduzzi, 2022).

Figura 10

Túnel de viento de circuito abierto

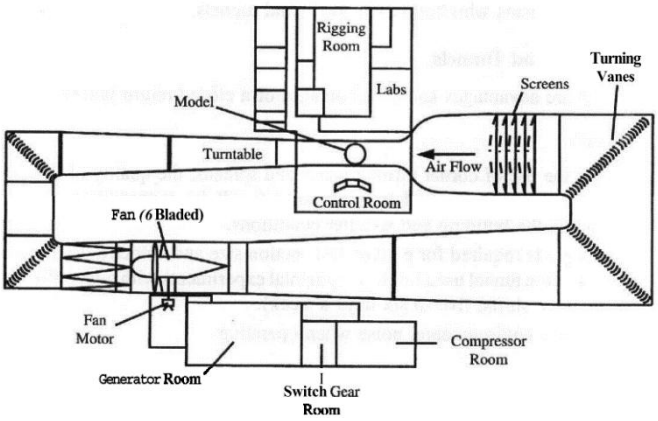


Nota. Obtenido del libro “Low-speed wind tunnel testing” de Barlow et al. (1999)

- Túnel de circuito cerrado. – El flujo de aire que circula dentro del túnel es de forma cíclica, haciendo prácticamente nulos los intercambios con la atmosfera y cambios en sus propiedades. El flujo se genera por un sistema de propulsión con ventilador, el cual pasa a través de las mismas secciones que el de circuito abierto, pero se incrementa un conducto más que conecta al difusor con la sección de entrada, cerrando el túnel, como en la figura 11 (Castaño, 2023b).

Figura 11

Túnel de viento de circuito cerrado



Nota. Obtenido del libro "Low-speed wind tunnel testing" de Barlow et al. (1999)

En la tabla 1 se observa la comparativa entre ventajas y desventajas de estos dos tipos de túnel de viento:

Tabla 1

Ventajas y desventajas del túnel de viento de circuito abierto y cerrado

Tipo de túnel	Ventajas	Desventajas
Circuito abierto	-Bajo costo de construcción. -No tiene problemas para su limpieza si es que se usan motores de combustión interna o cámaras de humo para visualizar el flujo.	-Dependiendo del entorno desde el cual se incorpore el flujo de aire, puede ser necesaria una filtración para obtener un flujo ordenado. -Mayor consumo de energía si se usa frecuentemente. -Generan un alto nivel de ruido, causando impactos ambientales, por lo que se recomienda que el lugar tenga aislamiento acústico.
Circuito cerrado	-Mejor control de la calidad de flujo ya que es independiente de situaciones o climas externos. -Menos energía para su funcionamiento. Generan un bajo nivel de ruido.	-Su costo inicial es elevado. -Mayor mantenimiento si se trabaja con motores de combustión interna o cámaras de humo. -Si se utiliza constantemente, puede ser necesario un sistema de refrigeración.

Nota. Adaptada del libro "Low-speed wind tunnel testing" de Barlow et al. (1999).

2.5.1.2 Tipología Física (Configuración de la sección de pruebas)

Se clasifican en dos secciones: de sección abierta cuando la sección de pruebas está conectada parcialmente o totalmente con el ambiente exterior, y de sección cerrada, donde la sección de pruebas está rodeada por paredes solidas que aíslan el flujo del exterior. La sección cerrada es la más común (Rodríguez & Muñoz, 2017).

2.5.1.3 Velocidad de Operación

Las velocidades que se alanzan en la sección de pruebas incluyen directamente en la clasificación del túnel. Este criterio se evalúa en función de la velocidad del sonido, expresada mediante el número de Mach (López, 2025), como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2

Clasificación en base al Número de Mach

Tipo de túnel	Número de Mach
Subsónico	$M < 0,7$
Transónico	$0,7 < M < 1,2$
Supersónico	$1,2 < M < 5$
Hipersónico	$M > 5$

Nota. Obtenido de (De La Calle, 2021).

El túnel de viento desarrollado en este estudio es de tipo subsónico. Este trabaja en un rango de velocidades menores a M=0.7, alcanza hasta 135 [m/s] en la sección de pruebas y cuenta con un diseño simple y reducido por su uso para fines didácticos (Jordán, 2019).

2.5.2 Partes del túnel de viento

El túnel de viento consta de 4 partes principales las cuales se complementan entre sí para lograr un funcionamiento eficiente:

2.5.2.1 Sección de Pruebas

Esta sección es un área donde va ubicado el objeto de estudio. En este punto el aire tiene que entrar de manera constante además de cumplir con las condiciones establecidas en la investigación (densidad y velocidad) equivalentes a las condiciones de funcionamiento del objeto estudiado. Permitiendo evaluar la interacción del fluido con la estructura y la aerodinámica del objeto y sus fuerzas resultantes como la de sustentación y arrastre (López & Sánchez, 2019). Dado que la cámara de prueba tiene medidas específicas, el material escogido de construcción es el acrílico, material transparente y resistente por el cual se puede observar los fenómenos que ocurren en los experimentos (González, 2021).

2.5.2.2 Sección de Contracción

Sección del túnel de viento que tiene como objetivo acelerar el flujo haciendo que el grosor de la capa limite disminuya y se dirija a la sección de pruebas. En el acceso de mayor amplitud se ubica una rejilla de panal (direccionador) para reducir al máximo las turbulencias del aire y garantizar una velocidad adecuada en la sección de pruebas (Roncancio & Reyes, 2018).

2.5.2.3 Direccionador de Flujo

Luego de análisis e investigaciones se determina que se tiene que colocar en toda el área de contracción, encargándose de que el flujo que entre al túnel se estabilice. Sin embargo, mediante diferentes pruebas, se concluyó que la mejor ubicación es entre la sección de contracción y la sección de pruebas. Este direccionador debe estar formado por sorbetes con suficiente área para lograr estabilizar el flujo (Casa, 2023).

2.5.2.4 Difusor

Sección final del túnel de viento, su función es desacelerar el flujo de aire disminuyendo la velocidad y aumentando su presión, este proceso es crucial para recuperar parte de la energía

cinética del aire y mejorar la eficiencia del túnel. Tiene 3 configuraciones: rectangular, cónico y rectangular-cónico (Figueroa & Cruz de Jesús, 2024).

2.6 Simulación Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en Ansys Fluent

Como se mencionó anteriormente, el estudio que utiliza CFD mediante herramientas como Ansys Fluent (Elgack et al., 2024) es esencial para analizar la comprensibilidad del aire y su comportamiento aerodinámico, en este tipo de simulaciones se obtienen el coeficiente de arrastre y sustentación, que son determinantes para evaluar el rendimiento aerodinámico, especialmente en perfiles NACA donde su relación Cd/Cl define su calidad (Murillo, 2022). A continuación, se detallaron cada una de las fases de la simulación en base a la guía oficial de Ansys Fluent (Ansys Fluent, 2025).

2.6.1 Geometría

Esta primera fase hace referencia a la representación bidimensional (2D) o tridimensional (3D) del objeto, componente o dominio físico que se desea analizar. En un software CAD se define la forma, superficie, volumen, bordes y vértices del diseño, como por ejemplo el alabe de una turbina, un perfil aerodinámico, un auto, etc. La geometría es la base de la simulación en Ansys Fluent ya que de acuerdo a esta se construirá la malla computacional adecuada.

2.6.2 Mallado

En este proceso, Ansys Fluent actúa como una herramienta estable en la generación de mallas no estructuradas, siendo capaz de manejar prácticamente mallas de cualquier tamaño y complejidad. Estas pueden estar compuestas por celdas hexaédricas, piramidales, poliédricas, prismáticas o tetraédricas; y su metodología de generación combina bloques geométricos básicos con datos geométricos extensos para automatizar el proceso de obtención de la malla. A su vez, soporta mallas híbridas que combinan capas prismáticas en las paredes para capturar correctamente la capa límite y reducir el número total de elementos mediante celdas estiradas,

así como mallas no conformes que permiten ensamblar diferentes regiones malladas independientemente, facilitando estudios paramétricos o modificaciones locales, y todas pueden transferirse directamente al solver.

2.6.3 Condiciones de contorno

Ansys Fluent dispone de una amplia gama de condiciones de contorno que permiten al flujo entrar y salir del dominio de solución. Estas condiciones se clasifican en límites externos (inlet, outlet, wall, symmetry y far-field), internos (interface, interior, etc.) y periódicos (periodic y rotational periodic); son fundamentales para definir correctamente el comportamiento del flujo en los contornos del dominio computacional. La selección apropiada de estas condiciones depende del tipo de aplicación y requiere información específica sobre las características del flujo. En este análisis se usaron las siguientes condiciones de contorno externas:

2.6.3.1 Velocity inlet

Permite definir la velocidad de flujo y sus propiedades escalares asociadas en la zona de entrada. En este caso a diferencia de otras condiciones la presión de estagnación no es constante, sino que varía según la presión estática obtenida del cálculo para garantizar el perfil de velocidad establecido. Es aplicable para flujos compresibles e incompresibles.

2.6.3.2 Pressure outlet

Definen una presión estática manométrica en la salida del dominio solo cuando se tiene un flujo subsónico, pero cuando el flujo se vuelve supersónico, tanto la presión como las demás variables se extrapolan desde el interior. Además, se deben especificar condiciones de reflujo (backflow) con valores realistas para el caso de inversión del flujo, minimizando así problemas de convergencia.

2.6.3.3 Wall

Se utiliza para definir los límites entre regiones fluidas y sólidas. En flujos viscosos se aplica por defecto la condición de no deslizamiento, aunque puede asignarse una velocidad tangencial o modelarse una pared con deslizamiento. También es posible usar *symmetry* para representar una pared sin esfuerzo cortante, pero esta condición se aplicará a todas las ecuaciones del flujo. El esfuerzo cortante y la transferencia de calor en la pared dependen de cómo se comporta el fluido justo al lado de la superficie sólida. Estos valores se calculan usando las condiciones locales del flujo, como los cambios de velocidad y temperatura cerca de la pared.

2.6.3.4 Symmetry

Se usa cuando la geometría física y el patrón esperado del flujo o de la distribución térmica presentan “simetría en espejo”, es decir, que todo lo que pasa en un lado del plano, ocurre igual, pero reflejado en el otro lado. En esta condición no es necesario definir condiciones específicas, sino ubicar correctamente los planos de simetría, ya que determinan el comportamiento del flujo en esas superficies.

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

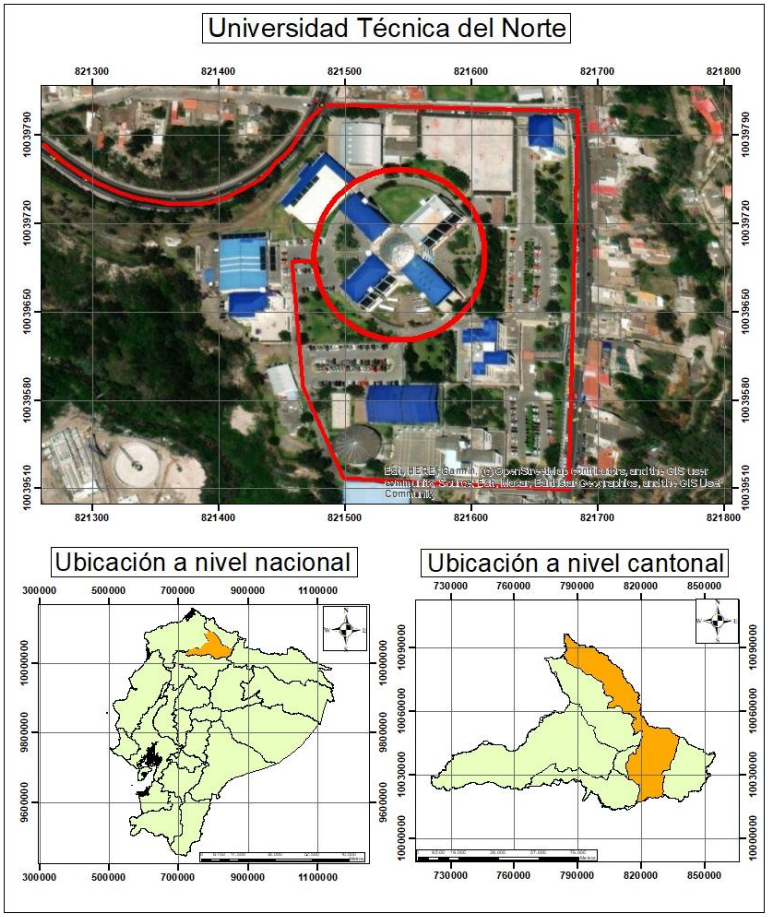
En este capítulo se detalló el área de estudio, materiales y métodos técnicos que se usaron en esta investigación para el diseño y construcción de un túnel de viento automatizado.

3.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la provincia de Imbabura, ciudad de Ibarra, específicamente en el campus El Olivo de la Universidad Técnica del Norte (UTN), en la Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales (FICAYA) en su Laboratorio de Energías Renovables, a una altitud de 2208 [msnm], temperatura de 17 [°C] y presión atmosférica de 77.47 [kPa] (Figura 12).

Figura 12

Mapa de ubicación



3.2 Métodos

3.2.1 Diseño del modelo de túnel de viento mediante simulación CFD y apoyo de un software CAD

El tipo de túnel de viento que se desarrolló es de circuito abierto, al igual que Maldonado & Calle (2023) en su estudio, pero modificada su sección circular a una rectangular debido a que tiene una mayor eficiencia y facilidad de implementación, según los parámetros analizados en la tabla 3. Cada parte de su diseño se realizó en el software CAD SolidWorks.

Tabla 3

Selección de la geometría de la cámara de pruebas

Características	Circular	Rectangular	Octogonal
Es modular	2	2	2
Accesibilidad para montaje y desmontaje del modelo	0	2	2
Transparencia, para la visualización	2	2	2
Facilidad de manufactura	2	2	1
Bajo costo de producción	2	2	1
Recomendaciones de autores	0	2	1
Bajo coeficiente de perdida	2	2	2
Sumatoria de puntuación	**10**	**14**	**11**

0: No es aceptable; 1: Aceptable; 2: Completamente aceptable

Nota. Obtenido de Cascante (2019)

La sección o cámara de pruebas es donde se coloca el objeto de estudio, este no debe pasar el 10% del área de la sección transversal dado que influye en las propiedades del flujo (N. Martínez et al., 2022). En consecuencia, este componente debe tener un tamaño adecuado

que facilite la experimentación y al mismo tiempo que permita alcanzar el rango de número de Reynolds objetivo de acuerdo al caso (F. Fernández et al., 2024). A su vez, aquí es donde se encuentra la mayoría de dispositivos de medición como: balanzas, tubos de Pitot y anemómetro (Figueroa & Cruz de Jesús, 2024).

Dimensiones propuestas

Velocidad de viento (v) = 0 – 10 [m/s]

Ancho = 200 [mm]

Alto = 200 [mm]

Largo (L) = 500 [mm]

Sección rectangular = 0.09 [m^2]

Para establecer las condiciones ambientales de la ciudad de Ibarra, en especial en la Universidad Técnica Norte, se partió de que está ubicada a una altitud 2208 [msnm] y tomando en cuenta los datos de la tabla 4, se obtuvieron los parámetros necesarios (presión atmosférica, velocidad del sonido y viscosidad) tras interpolar.

Tabla 4

Parámetros termodinámicos de la Universidad Técnica del Norte

Altura [msnm]	**Presión [kPa]**	**Gravedad [g, m/s^2]**	**Velocidad del sonido [m/s]**	**Viscosidad dinámica [kg/m*s]**
2200	77.55	9.800	331.7	1.720×10^{-5}
2208	**77.47**	**9.79996**	**331.672**	**1.71972×10^{-5}**
2400	75.63	9.799	331.0	1.713×10^{-5}

Nota. Datos obtenidos de la tabla A-16 del libro “Termodinámica” de Cengel & Boles (2012)

Aunque en la tabla 4 hay una densidad la cual se puede obtener interpolando, se optó por calcularla aparte con la ecuación 1, ya que la temperatura de Ibarra difiere a la de la tabla

4 y esta variable influye directamente en la densidad. Para saber qué tipo de flujo tiene esta sección se aplicó la ecuación 1 correspondiente al Número de Reynolds. Donde D, al no ser una sección circular, se reemplazó por el diámetro hidráulico (Dh), el cual se calcula con la ecuación 10 (Polo, 2021).

$$Dh = \frac{4*A}{P} \qquad \textbf{(Ec. 10)}$$

Donde:

- Dh: diámetro hidráulico
- A: área neta de la sección transversal
- P: perímetro

A continuación de acuerdo al valor calculado se identificó a que tipo de flujo pertenece siguiendo la tabla 5.

Tabla 5

Clasificación del régimen de flujo

Tipo de flujo	Número de Reynolds
Flujo Laminar	Re < 2000
Flujo de Transición	2000 < Re < 4000
Flujo Turbulento	Re > 4000

Nota. Tabla realizada con los datos extraídos de Mott & Untener (2015)

Al tener la geometría establecida del túnel de viento, se establecieron las condiciones del fluido que va a circular con el objetivo de seleccionar el motor (ventilador) (Ludeña, 2019):

- Tipo de fluido: Aire
- Lugar de instalación: Ibarra – Laboratorio de Energías Renovables – FICAYA – Universidad Técnica del Norte
- Altura de instalación: 2208 [msnm]

- Densidad aire: 0,9358 [kg/m^3]
- Velocidad: 10 [m/s]

Con las condiciones del fluido se calculó primero el caudal de aire necesario (ecuación 11) y luego el flujo masico (ecuación 12) (White, 2004).

$$Q = v * A \qquad \textbf{(Ec.11)}$$

Donde:

- Q: caudal de aire [m^3/s]
- v: velocidad del fluido en la sección de pruebas [m/s]
- A: área de la sección de pruebas [m^2]

$$\dot{m} = \rho * v * A \qquad \textbf{(Ec. 12)}$$

Donde:

- $\dot{m}$: flujo masico [kg/s]
- ρ: densidad del aire [kg/m^3]
- v: velocidad del fluido en la sección de pruebas [m/s]
- A: área de la sección de pruebas [m^2]

Como en cualquier dispositivo, esta sección presentó cierto grado de pérdidas. Estas corresponden a un buen manejo, control y medición ingenieril para que sean consideradas aceptables para cualquier producción. Por este motivo se consideraron tanto pérdidas mayores como menores, pero las consideradas siempre serán las mayores. Dichas pérdidas se determinaron con la ecuación de Darcy (ecuación 13), la cual se utiliza para conductos circulares constantes, es decir, con el diámetro, pero como en este caso es una sección no circular, el diámetro se reemplazó con el diámetro hidráulico (Bustillos & Zambrano, 2018).

$$h_{L\ mayor} = f\frac{Lv^2}{D_h 2g} \qquad \textbf{(Ec. 13)}$$

Donde:

- $h_{L\,mayor}$: pérdidas mayores [m]
- f: factor de fricción (adimensional)
- L: longitud del conducto [m]
- v^2: velocidad en la sección de prueba [m/s]
- D_h: diámetro hidráulico en la sección de prueba [m]
- g: gravedad [m/s^2]

Para determinar el factor de fricción (f) en flujo laminar se lo puede calcular (ya sea a partir de la ecuación de Hagen-Poiseuille o la ecuación de Darcy) a partir de la ecuación 14:

$$f = \frac{64}{Re} \qquad \textbf{(Ec. 14)}$$

Donde:

- f: factor de fricción
- Re: número de Reynolds

Por el contrario, cuando se tenga un flujo turbulento se hace uso de la ecuación 15, que fue desarrollada por P. K. Swamee y A. K. Jain:

$$f = \frac{0.25}{\left[log\left(\frac{1}{3.7(\frac{Dh}{\varepsilon})} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)\right]^2} \qquad \textbf{(Ec. 15)}$$

Donde:

- f: factor de fricción
- Dh/ε: rugosidad relativa

Las pruebas han demostrado que el factor de fricción (f) depende del número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería. Esta rigurosidad es la relación entre el diámetro hidráulico (D_h) de la tubería y la rigurosidad promedio (ε) de la pared de la tubería. Para tubos

y tuberías de uso comercial, los valores de rugosidad promedio a utilizar en el diseño se presentan en la tabla 6, sin embargo, estos valores son establecidos para tuberías nuevas por lo que puede variar con el tiempo de uso (Mott & Untener, 2015).

Tabla 6

Rigurosidad de la tubería – valores de diseño

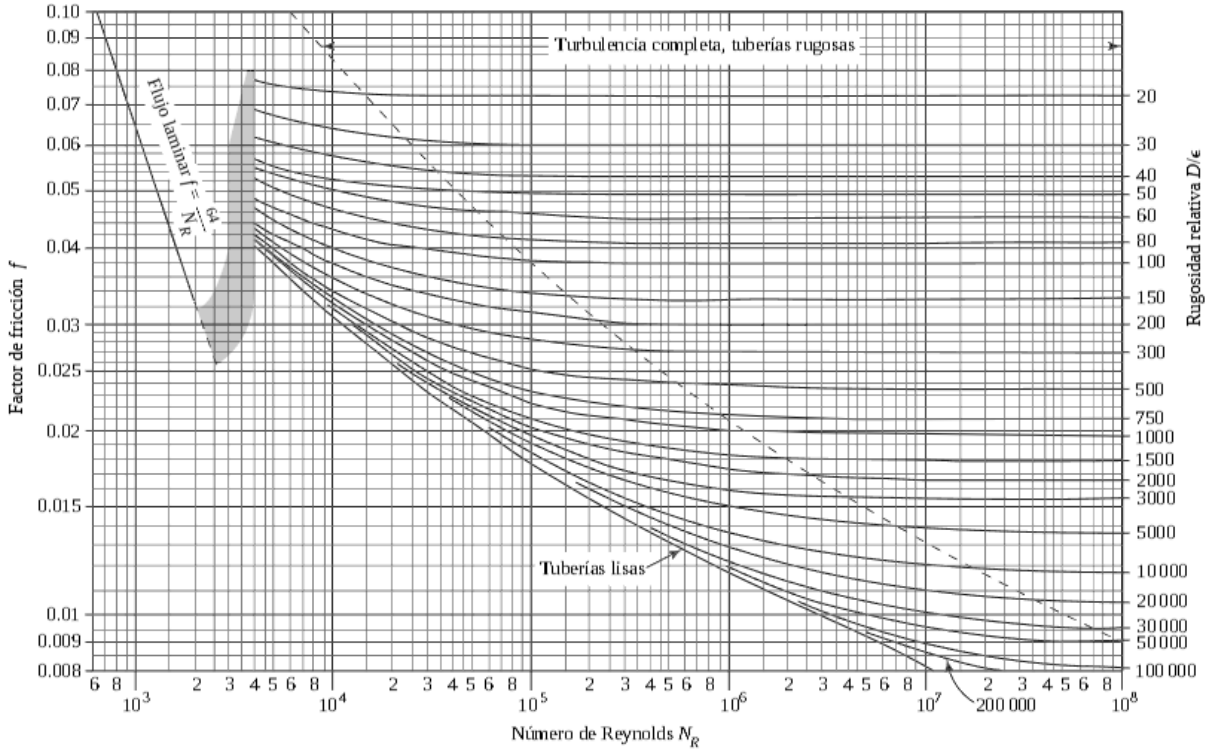
Material	**Rugosidad ε [m]**
Vidrio	Liso
Plástico	3.0×10^{-7}
Tubo estirado; cobre; latón; acero	1.5×10^{-6}
Acero, comercial o soldado	4.6×10^{-5}
Hierro galvanizado	1.5×10^{-4}
Hierro dúctil – revestido	1.2×10^{-4}
Hierro dúctil – sin revestir	2.4×10^{-4}
Concreto, bien hecho	1.2×10^{-4}
Acero remachado	1.8×10^{-3}

Nota. Obtenida del libro “Mecánica de Fluidos” de Mott & Untener (2015)

Otro método que se utilizó es el Diagrama de Moody (figura 13) ya que para las iteraciones es importante partir de un valor inicial hasta llegar a uno más próximo (Bustillos & Zambrano, 2018).

Figura 13

Diagrama de Moody



Nota. Obtenido del libro Mecánica de Fluidos (Mott & Untener, 2015).

En este sentido, se dimensionó la sección de contracción, esta toma un gran volumen de aire a baja velocidad y lo reduce a un pequeño volumen a alta velocidad reduciendo simultáneamente la presión sin crear turbulencias en el flujo, es decir, manteniéndolo en estado laminar en todo el trayecto hasta llegar a la sección de pruebas (Villacrés & Sumi, 2017). Esta variación de presión da lugar a una variación en la densidad (propio de flujos compresibles), dada esta variación es necesario calcular la densidad para aplicar correctamente la ecuación de Bernoulli y los demás cálculos. No obstante, si la variación de presión es pequeña, la densidad se puede considerar constante lo que hace que tengamos al aire como un flujo incompresible (Bustillos & Zambrano, 2018). Para garantizar esta estabilidad en el flujo, en el acceso de mayor amplitud se va a ubicar una rejilla para reducir al máximo las turbulencias que puedan presentarse en el aire al ingresar a esta sección (Roncancio & Reyes, 2018).

De esta manera, para poder confirmar que el túnel de viento a realizar sea subsónico y además saber qué tipo de fluido tenemos (compresible o incompresible), se calculó el número de Mach con la ecuación 2. Si nos da un resultado menor a 0.3 el fluido puede considerarse incomprensible y si llega a 1, está igualando la velocidad del sonido y por lo tanto se considera compresible. La clasificación del flujo suele considerarse siguiendo la tabla 7 (De La Calle, 2021).

Tabla 7

Clasificación de flujos de aire en base al Número de Mach

Tipo de flujo	Número de Mach
Subsónico	M < 0,7
Transónico	0,7 < M < 1,2
Supersónico	1,2 < M < 5
Hipersónico	M > 5

Nota. Obtenido de (De La Calle, 2021).

Para el cálculo del área de entrada se tomó en cuenta que la relación de compresión recomendada tiene un valor entre 6 a 10 (Barlow et al., 1999) al momento de aplicar la ecuación 16 (Guachamín, 2024):

$$\frac{A_1}{A_2} = RC \qquad \textbf{(Ec. 16)}$$

Donde:

- A_1: área de entrada a la sección de contracción [m^2]
- A_2: área de salida de la sección de contracción [m^2]
- RC: relación de compresión (considerado 8)

Dimensiones propuestas

- Velocidad de salida (v_2) = 10 [m/s]
- Área de entrada (A_1) = 0.72 [m^2]
- Área de salida (A_2) = 0.09 [m^2]
- Densidad = 0.9358 [kg/m^3]
- Presión atmosférica (P_1) = 77.47 [kPa]

La velocidad de inicio a la sección de contracción se calculó con la ecuación de la Continuidad (ecuación 17) (Mott & Untener, 2015) dado que teóricamente el flujo másico, la temperatura y la presión se mantienen constantes a lo largo de esta sección (Mancilla et al., 2020). Tomando en cuenta que la densidad es la misma en los puntos 1 y 2.

$$\rho_1 * v_1 * A_1 = \rho_2 * v_2 * A_2 \qquad \textbf{(Ec. 17)}$$

Donde:

- ρ_1: densidad del fluido en el punto 1 [kg/m^3]
- v_1: velocidad del fluido en el punto 1[m/s]
- A_1: área de entrada a la sección de contracción [m^2]
- ρ_2: densidad del fluido en el punto 2 [kg/m^3]
- v_2: velocidad del fluido en el punto 2 [m/s]
- A_2: área de salida de la sección de contracción [m^2]

Ahora se procede al cálculo de la caída de presión en la sección de contracción utilizando la fórmula de la ecuación de Bernoulli (ecuación 18) (White, 2004) tomando en cuenta que la variable z no se va a considerar dado que no existe altura. (Maldonado & Calle, 2023).

$$P1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + gz_1 = P2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + gz_2 \qquad \textbf{(Ec. 18)}$$

Donde:

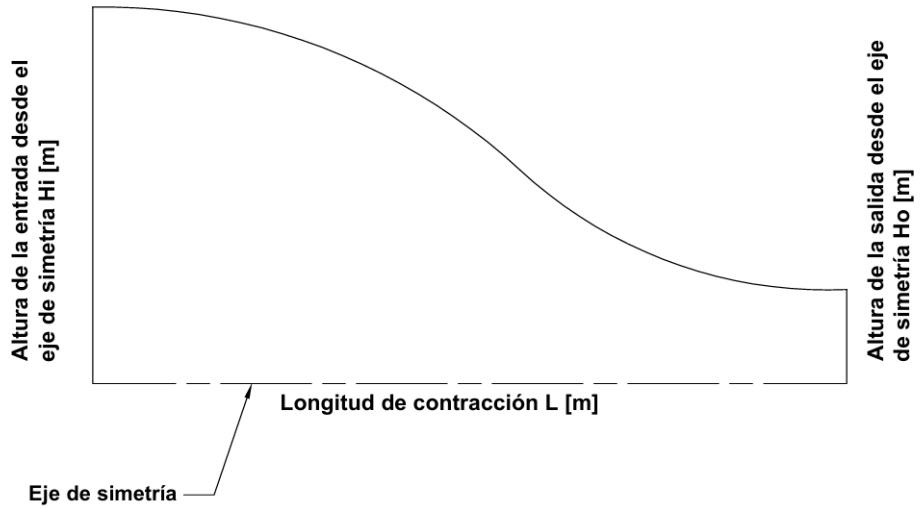
- P1, P2: presión del fluido en los puntos 1 y 2 [kPa]

- V_1, V_2: velocidad del fluido en los puntos 1 y 2 [m/s]
- z_1, z_2: altura o elevación del fluido con respecto a un punto de referencia en los puntos 1 y 2 [m]
- ρ: densidad del aire [kg/m^3]
- g: gravedad [m/s^2]

Con esto calculado se dio a paso al diseño de la geometría de contracción a partir de una ecuación polinómica de quinto orden, esta sugiere que el radio de curvatura a la salida sea mayor que el de la entrada. Tanto sus cotas como la forma de la sección de contracción hacia la entrada a la sección de pruebas en la figura 14.

Figura 14

Cotas y sección de pruebas



Nota. Obtenida de (Mott & Untener, 2015).

En base al cálculo anterior, se calculó la base de entrada de la sección de contracción (ecuación 19), altura de la entrada a la sección (ecuación 20) y su longitud (ecuación 21):

$$b = \sqrt{\frac{A_1}{A_2} * bts} \qquad \textit{(Ec.19)}$$

Donde:

- b: base de entrada de la sección de contracción [m]

- bts: base de la sección de pruebas [m]

Para la ecuación 20 se utilizó la recomendación de la relación alto – ancho (1.5 m) (Barlow et al., 1999).

$$a = \frac{b}{1.5} \qquad \textbf{(Ec. 20)}$$

Donde:

- a: altura de la sección de contracción [m]
- b: base de entrada de la sección de contracción [m]

En túneles aerodinámicos con número de Mach igual o inferior a 1, la relación óptima entre la altura y la longitud del cono de contracción varía entre 0.5 y 1.5 veces la altura (Guachamín, 2024).

$$L = 1.5 * a \qquad \textbf{(Ec. 21)}$$

Donde:

- L: longitud de la sección de contracción [m]
- a: altura de la sección de contracción [m]

La ecuación 22 se empleó para generar la curva, la cual deberá ser evaluada posteriormente para determinar las pérdidas generadas por la geometría. Si los resultados son aceptables, se dará por finalizado el diseño; en caso contrario, será necesario ajustar las dimensiones hasta obtener un resultado adecuado.

$$h = [-10(\xi)^3 + 15(\xi)^4 - 6(\xi)^5](H_i - H_o) + \mathrm{H_i} \qquad \textbf{(Ec. 22)}$$

Donde:

- ξ: razón de longitud
- L: longitud de la sección de contracción [m]
- H_i: altura de la contracción en la entrada de aire a partir del eje de simetría [m]
- H_o: altura de la contracción en la salida de aire a partir del eje de simetría [m]
- h: altura de la sección de contracción a una longitud “x” [m]

Para calcular la razón de longitud utilizaremos la ecuación 23.

$$\xi = \frac{x}{L} \qquad \textit{(Ec. 23)}$$

Donde:

- ξ: razón de longitud
- x: longitud de la contracción parcializada en pequeños tramos [m]

Para la estimación de las pérdidas en esta sección se utilizó la tabla 8, sin embargo, primero fue necesario calcular la relación entre el radio de contracción "r" y el diámetro final que vendría a ser Dh (Bustillos & Zambrano, 2018). Según Mott & Untener (2015), si esta relación es mayor a 0.15 se considerará que la contracción es redondeada y se debe aplicar un coeficiente de pérdida de 0.04, es decir, pérdidas mínimas de energía.

Tabla 8

Pérdidas para tuberías en contracción

r/D₂	**K**
0	0.50
0.02	0.28
0.04	0.24
0.06	0.15
0.10	0.09
>0.15	0.04 (Bien redondeada)

Nota. Obtenido de (Mott & Untener, 2015).

Las pérdidas se calcularán con la ecuación 24:

$$hf = K_c \frac{v^2}{2g} \qquad \textit{(Ec. 24)}$$

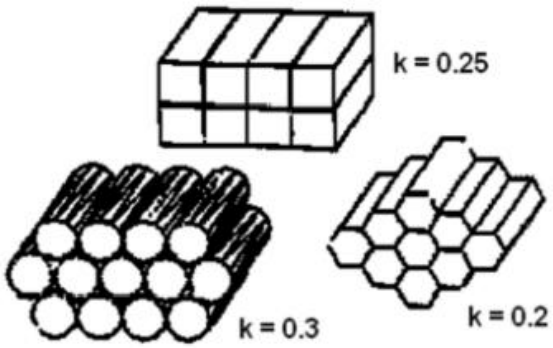
Donde:

- hf: pérdidas de carga por fricción [m]
- K_c: coeficiente de pérdidas de contracción
- v^2: velocidad a la salida de la sección de contracción [m/s]
- g: gravedad [m/s^2]

Un direccionador o acondicionador de flujo cumple la función de dirigir y estabilizar el flujo de un fluido en una dirección especifica, en el caso de un túnel de viento se ubicará en la entrada de la sección de contracción para rectificar el aire que ingrese. Existen varias configuraciones geométricas (sección cuadrada, hexagonal y circular) como se observa en la figura 15 (Bustillos & Zambrano, 2018).

Figura 15

Direccionadores de flujo



Nota. Obtenido de (Mott & Untener, 2015).

Para seleccionar el tipo de geometría se deberá considerar las pérdidas presentes al utilizar cada uno y la complejidad de construcción (Bustillos & Zambrano, 2018). Dichas pérdidas se originan por los efectos de fricción entre el fluido y las paredes del dispositivo, así como por la presencia de turbulencias, recirculaciones y vórtices producidos durante el cambio de dirección, estos están condicionados por la forma y dimensiones del direccionador, así como la velocidad y densidad del fluido. Para reducir estas pérdidas se recomienda el uso de

configuraciones tipo panal y seleccionar materiales con bajo coeficiente de fricción (Maldonado & Calle, 2023).

Para calcular estas pérdidas se utilizará la ecuación 25:

$$hf = K_{df} \frac{v^2}{2g} \quad \textbf{(Ec. 25)}$$

Donde:

- hf: pérdidas de carga por fricción [m]
- K_{df}: coeficiente de pérdidas del direccionador de flujo
- v^2: velocidad a la salida de la sección de contracción [m/s]
- g: gravedad [m/s^2]

Para definir la geometría del difusor es necesario encontrar el punto óptimo para aumentar el área sin permitir que la capa limite se desprenda. Primero se calculará la relación de áreas de entrada y salida (ecuación 26), sin embargo, también es posible con el ángulo equivalente de cono que surge al azar un cono truncado entre el área de entrada y salida, se recomienda que la relación de áreas no sea mayor que 6:1 y el ángulo debe ser de 7 grados o menos (Castellanos, 2020).

$$A_r = \frac{A_2}{A_1} \quad \textbf{(Ec. 26)}$$

Donde:

- Ar: relación de áreas
- A_2: área de salida del difusor [m^2]
- A_1: área de entrada del difusor [m^2]

El A_1 es el mismo que en la sección de pruebas mientras que el A_2 será definida al momento de elegir el ventilador adecuado y partiendo de la relación de áreas podemos obtener el ángulo de apertura del difusor mediante la ecuación 27 (Casa, 2023).

$$\theta = arctan\left(\frac{1}{2} * \frac{\sqrt{A_r - 1}}{\frac{L}{D_h}}\right) \quad \textit{(Ec. 27)}$$

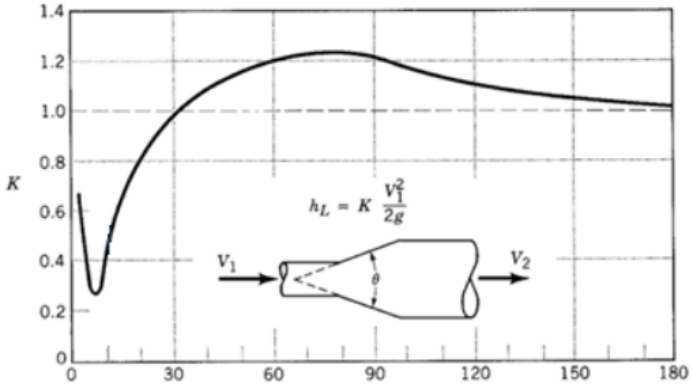
Donde:

- θ: ángulo de apertura del difusor [°]
- A_r: relación de áreas
- L: longitud del difusor [m]
- D_h: diámetro hidráulico

En la figura 16 se muestra cómo se pude obtener el coeficiente de pérdidas en función del ángulo de apertura calculado.

Figura 16

Gráfica de coeficientes de pérdidas para el difusor



Nota. Obtenido de (Munson et al., 1999).

Luego de ubicar el coeficiente en la gráfica, se calculará las pérdidas con la ecuación de pérdidas menores de flujo (ecuación 28):

$$h_L = k_L \frac{v_3^2}{2g} \quad \textit{(Ec. 28)}$$

Donde:

- h_L: pérdidas en el difusor
- k_L: coeficiente de pérdidas

- v: velocidad a la salida del difusor [m/s]
- g: gravedad [m/s^2]

La velocidad en la salida del difusor (ecuación 24) es desconocida, esta puede determinarse a partir del caudal quien se mantiene constante en todo el túnel o con la ecuación de la continuidad (ecuación 29) (Bustillos & Zambrano, 2018).

$$v_{dif} = v_{sección\ prueba} * \frac{A_2}{A_3} \qquad \textbf{(Ec. 29)}$$

Donde:

- v_{dif}: velocidad del difusor [m/s]
- $v_{sección\ prueba}$: velocidad en la sección de pruebas [m/s]
- A_2: área salida de la sección de prueba [m^2]
- A_3: área salida del difusor [m^2]

Para finalizar el diseño con los datos obtenidos se puede calcular la presión de salida en el difusor con la ecuación de Bernoulli, pero como el peso específico, la altura y la densidad no varían se simplifica quedando una ecuación de Bernoulli simplificada (ecuación 30) (Casa, 2023):

$$P_2 + \frac{1}{2} * v_2^2 = P_3 + \frac{1}{2} * v_3^2 \qquad \textbf{(Ec. 30)}$$

Donde:

- P_2: presión a la entrada del difusor [Pa]
- v_2^2: velocidad a la entrada del difusor [m/s]
- P_3: presión a la salida del difusor [Pa]
- v_3^2: velocidad a la salida del difusor [m/s]

Una vez terminados todos los cálculos de las pérdidas presentes en el túnel de viento se realizará una sumatoria total de las mismas con la ecuación 31 (Bustillos & Zambrano, 2018):

(Ec. 31)

$$h = f\frac{L_{pr}v_{pr}^2}{D_h 2g} + \sum_{i=1}^{n} k\frac{v_i}{2g}$$

$$h = f\frac{L_{pr}v_{pr}^2}{D_h 2g} + k_c\frac{{v_c}^2}{2g} + k_{df}\frac{{v_{df}}^2}{2g} + k_L\frac{{v_L}^2}{2g}$$

Donde:

- f: factor de fricción en la sección de pruebas
- L_{pr}: longitud de la sección de pruebas [m]
- D_h: diámetro hidráulico de la sección de pruebas [m]
- v_{pr}: velocidad de la sección de pruebas [m/s]
- v_c: velocidad en la contracción
- v_{df}: velocidad en el direccionador de flujo
- v_L: velocidad en el difusor
- k_c: coeficiente de pérdidas de la contracción
- k_{df}: coeficiente de pérdidas del direccionador de flujo
- k_L: coeficiente de pérdidas del difusor

Para el análisis en CFD se usará el software Ansys Fluent este es utilizado para simular diversos tipos de flujos. El análisis comienza con el preprocesamiento, que incluye la creación de la geometría en 2D o 3D y la generación de la malla. Luego, el software realiza los cálculos numéricos y entrega resultados que se interpretan en el postprocesamiento (Ansys Fluent, 2025). Ansys Fluent proporciona capacidades de modelado integrales para una amplia gama de fluidos compresibles e incompresible, con regímenes de movimiento de flujo laminares y turbulentos. Su resolución se basa en las ecuaciones de Navier-Stokes para fluido incompresible: continuidad, momento y energía (Dávalos, 2020).

La ecuación de continuidad representa el principio de conservación de la masa en su formulación vectorial (ecuación 32), estableciendo que la divergencia del campo de velocidades debe ser nula (Mera, 2025):

$$\nabla . v = 0 \qquad \textbf{\textit{(Ec. 32)}}$$

Donde:

- v: vector velocidad del fluido [m/s]

La ecuación de movimiento (ecuación 33), basada en la segunda ley de Newton, expresa en forma vectorial cómo se distribuye y varía el movimiento del fluido bajo la influencia de fuerzas internas, como la presión y la viscosidad, así como de fuerzas externas, como la gravedad (Mera, 2025):

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + (v.\nabla)v\right) = -\nabla p + \mu\nabla^2 v + f \qquad \textbf{\textit{(Ec. 33)}}$$

Donde:

- ρ: densidad del fluido [kg/m^3]
- v: vector de velocidad del fluido [m/s]
- p: presión [Pa]
- μ: viscosidad dinámica [kg/m*s]
- f: fuerzas externas (gravedad 9.81[m/s^2]
- t: tiempo [s]

La ecuación de energía (ecuación 34) se deriva de la primera ley de la termodinámica aplicada a un volumen de control, y expresa la conservación de la energía interna del fluido en forma vectorial. Asimismo, describe cómo esta energía varía en función de la transferencia de calor y los efectos de disipación viscosa (Mera, 2025):

$$\rho C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t} + v.\nabla T\right) = k\nabla^2 T + \phi \qquad \textbf{\textit{(Ec. 34)}}$$

Donde:

- C_p: calor específico [J/kg*K]
- T: temperatura [K]
- k: conductividad térmica [W/m*K]
- ϕ: disipación viscosa [J/s*m^3]

3.2.2 Construir un prototipo de túnel de viento automatizado a partir del diseño propuesto

Como ya se mencionó este prototipo va a ser construido e implementado en el Laboratorio de Energías Renovables de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales (FICAYA). Cada parte del túnel de viento: acondicionador de flujo, sección de contracción, sección de pruebas, difusor y estructura; será realizado en SolidWorks, un software CAD en 2D y 3D para modelar piezas y ensamblajes que ofrece una amplia gama de soluciones para cubrir los aspectos implicados en el proceso de diseño del prototipo. “Sus productos ofrecen la posibilidad de crear, diseñar, simular, fabricar, publicar y gestionar los datos del proceso de diseño” (Dassault Systèmes, 2020).

La automatización del túnel de viento empleará un mini anemómetro digital UT363BT con salida bluetooth junto con un dimmer para regular la potencia entregada al ventilador AC modelo FD1238A1HS. Los datos obtenidos se detectarán utilizando el software Python donde se creará una interfaz la cual los agrupará en un archivo de Excel, donde se realizará el procesamiento y visualización avanzada de los datos mediante las gráficas correspondientes a la caracterización aerodinámica del perfil, incluyendo curvas de sustentación frente al ángulo de ataque y curvas de arrastre frente al número de Reynolds. Este proceso nos permitirá obtener una representación precisa y completa del comportamiento aerodinámico del perfil NACA 6412 bajo distintas condiciones, optimizando la eficiencia y confiabilidad del sistema experimental.

3.2.3 Modelar un perfil NACA tipo para su correcta evaluación aerodinámica dentro del túnel de viento diseñado

El perfil aerodinámico que se analizó es el NACA 6412 ya que en el estudio de (Hernández et al., 2021) se demostró que debido a su diseño aerodinámico asimétrico que le otorga un rendimiento superior frente al flujo de aire en comparación con perfiles simétricos como el NACA 0018 y el NACA 0021. A pesar de tener un espesor máximo similar, su curvatura permite optimizar la distribución del flujo de aire, mejorar la generación de sustentación y reducir la turbulencia, especialmente en el borde de salida.

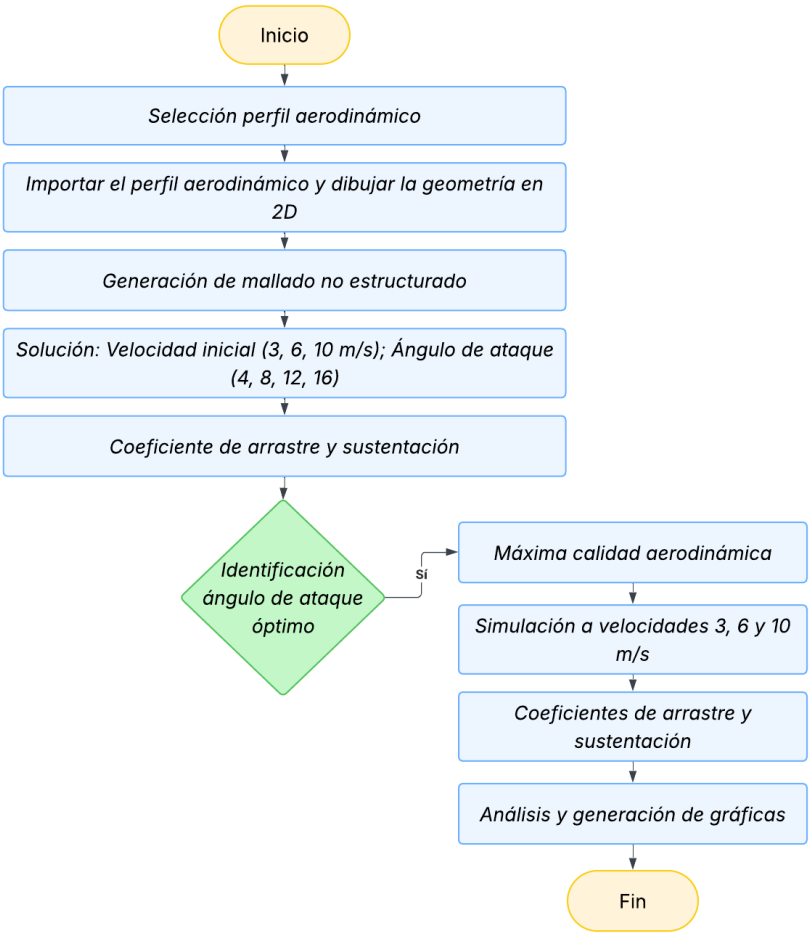
El perfil NACA 6412, de la serie 6, presenta un espesor máximo del 12 % de la cuerda (~30,1 % desde el borde de ataque) y una curvatura máxima del 6 % (~39,6 % de la cuerda). Según el análisis numérico realizado con XFoil a Re = 500 000, alcanza una eficiencia aerodinámica Cl/Cd máxima de aproximadamente 114.2 a un ángulo de ataque cercano a 6.25°, lo que indica un excelente comportamiento en sustentación y bajo arrastre. Adicionalmente, estudios comparativos con otros perfiles muestran que el NACA 6412 logra una relación Cl/Cd significativamente más alta, y su ángulo de pérdida se sitúa alrededor de los 13°**,** evidenciando estabilidad en operación de alto rendimiento. Estas características lo convierten en una opción ideal para simulaciones CFD y aplicaciones en aerogeneradores y túneles de viento subsónico (Majid & Jo, 2021).

Siguiendo el enfoque de Ibrahim et al. (2025) adaptándole a nuestro perfil escogido, se realizó un análisis inicial variando varias velocidades de viento con el fin de identificar la condición más adecuada para el estudio aerodinámico y una vez determinada la velocidad óptima, se procedió a evaluar distintos ángulos de ataque utilizando el solver ANSYS con el objetivo de encontrar el ángulo de ataque óptimo del perfil, para posteriormente analizar su reacción a diferentes velocidades (3, 6 y 10 m/s). Este estudio considero factores fundamentales que influyen en el desempeño aerodinámico del perfil seleccionado, como la distribución de

velocidad y presión, la formación de turbulencia y su tiempo de disipación en un análisis 2D del perfil aerodinámico. El objetivo es comprender cómo estos parámetros se modifican bajo diferentes condiciones de contorno (CC) durante el análisis. Las ecuaciones de Navier-Stokes, junto con las ecuaciones de continuidad y movimiento, se resuelven mediante el algoritmo CFD implementado en ANSYS Fluent. En la figura 17 se detalla del diagrama de flujo del procedimiento y a continuación se detalla cada fase del procedimiento numérico.

Figura 17

Diagrama de flujo de la simulación en CFD



3.2.3.1 Modelado Geométrico

Para diseñar y modelar físicamente este perfil, primero se obtuvieron las coordenadas desde la base de datos AirfoilTools, donde se presentan en formato .dat con valores de “x” y “y” normalizados a una cuerda unitaria (c = 1). Estas coordenadas se importaron a

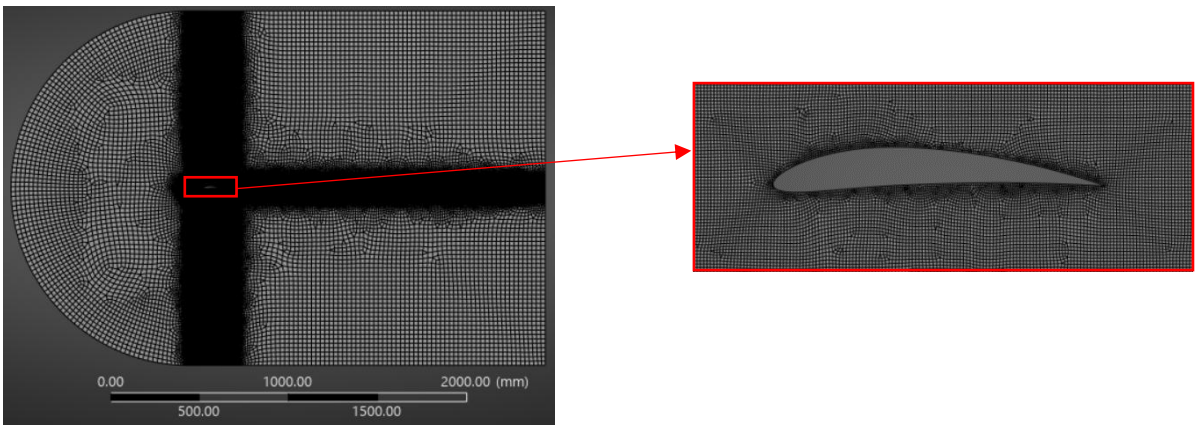
ANSYS/Workbench con la cuerda real deseada (100 mm) en el módulo Design Modeller, donde, siguiendo la metodología de Berger et al. (2024) la altura abarca 20 veces la longitud de la cuerda, 10 veces por encima y 10 veces por debajo del perfil aerodinámico y la longitud es 20 veces la longitud de la cuerda.

3.2.3.2 Generación del Mallado

El tamaño de la malla es crucial para la generación de resultados precisos y confiables. Mientras más aumenta el número de elementos, la solución resultante tiene una mayor precisión, sin embargo, este aumento demanda mayores recursos computacionales en cuestión de memoria y tiempo de simulación. Como se observa en la figura 18, se realizó un refinamiento de la malla alrededor del perfil aerodinámico con el fin de capturar adecuadamente los gradientes de velocidad y presión. Por lo tanto, es importante determinar un número de elementos óptimos para obtener resultados válidos.

Figura 18

Sensibilidad de mallado



3.2.3.3 Solución Numérica

El modelo de turbulencia SST k-ω constituye un sistema biparamétrico ampliamente reconocido en la literatura técnica, que caracteriza la turbulencia a través de dos ecuaciones de transporte: una para la energía cinética turbulenta (k) y otra para la tasa de disipación específica (ω). Su formulación de Transporte de Esfuerzos Cortantes (SST) integra las ventajas de dos

metodologías complementarias, empleando el modelo k-ω en las regiones internas de la capa límite, lo que permite su aplicación directa hasta la pared dentro de la subcapa viscosa (Ibrahim et al., 2025). Las ecuaciones 35 y 36 expresan matemáticamente la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación específica, respectivamente (Valencia et al., 2021).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \qquad \textbf{(Ec. 35)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \qquad \textbf{(Ec. 36)}$$

Donde:

- μ_t: viscosidad turbulenta
- G_k: generación de turbulencia de energía cinética debido a los gradientes de velocidad
- G_b: generación de turbulencia de energía cinética debido a la flotabilidad
- Y_M: contribución de la dilatación fluctuante a la tasa de disipación total

No obstante, en el presente estudio no se emplea este modelo en las simulaciones numéricas, sino que se considera como referencia teórica debido a su amplia aplicación en estudios aerodinámicos. En su lugar, se seleccionó el modelo de turbulencia Spalart–Allmaras, el cual corresponde a un enfoque monoequacional que resuelve una única ecuación de transporte para una viscosidad turbulenta modificada (Berger et al., 2024). Este modelo ha sido ampliamente utilizado en simulaciones de flujos aerodinámicos externos, como los desarrollados en túneles de viento, debido a su bajo costo computacional y adecuada precisión en la predicción de capas límite adheridas (D'Alessandro et al., 2017). En el contexto de esta investigación, su implementación permite analizar de manera eficiente el comportamiento aerodinámico del perfil evaluado y obtener los coeficientes de sustentación y arrastre en función del ángulo de ataque.

3.2.3.4 Condiciones de Contorno (CC)

Esta fase es fundamental en la simulación porque aquí se determina las condiciones físicas bajo las cuales va a operar el modelo CFD. Si estas condiciones están mal configuradas, toda la simulación será incorrecta a pesar de que la malla sea buena. En el apartado Setup del ANSYS/Workbench primero se determinó el tipo y estado del fluido de trabajo (estacionario o transitorio), las velocidades de aire de entrada (3, 6 y 10 m/s) en Boundary Conditions, y se estableció que resultados quiero obtener, en este caso fueron los coeficientes y fuerzas de arrastre y sustentación además de los residuales para ver qué tan real es fue la simulación realizada.

Los parámetros de diseño iniciales pertinentes al perfil aerodinámico 6412 se presentan en la tabla 9.

Tabla 9

Condiciones iniciales y de contorno

Propiedad	Valor
Perfil aerodinámico	NACA 6412
Densidad del aire	0.9358 [kg/m^3]
Velocidad de entrada	3, 6, 10 [m/s]
Viscosidad	1.7197 x 10^{-5} [kg/m*s]
Presión de salida	77470 [Pa]
Ángulo de ataque	4, 8, 12, 16 [°]
Model Solutions	Spalart – Allmaras
Face Meshing	Triangular
Residual	10^{-6}

Nota. Estado estacionario, pared fija, sin deslizamiento, sin rugosidad

3.2.3.5 Validación del Modelo CFD

La validación del presente estudio se realizó mediante el análisis del coeficiente de arrastre aplicando las condiciones de simulación CFD de la investigación de Berger et al. (2024), comparando los resultados obtenidos con los datos reportados en el trabajo de referencia del mismo perfil aerodinámico bajo condiciones de flujo similares como se indica en la tabla 10.

Tabla 10

Condiciones de contorno

Parámetros	Berger et al. (2024)
Perfil aerodinámico	NACA 6412
Densidad del aire	1.225 [kg/m^3]
Velocidad de entrada	10 [m/s]
Viscosidad dinámica	1.7894 x 10^{-5} [kg/m*s]
Ángulo de ataque	0 [°]
Model Solutions	Spalart – Allmaras
Face Meshing	Cuadrilátera
Residual	10^{-6}

3.3 Materiales, equipos y software

Los materiales de campo, materiales de laboratorio, equipos y software que se emplearán en el desarrollo de la investigación están descritos en la tabla 11.

Tabla 11

Materiales, equipos y software a emplear en la investigación

Materiales	Equipos	Software
Acrílico PLA Estructura de metal Sintra PVC	Laptop Anemómetro	SolidWorks Ansys Ansys Fluent xflr5 Wind Pro Wind Atlas Python

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

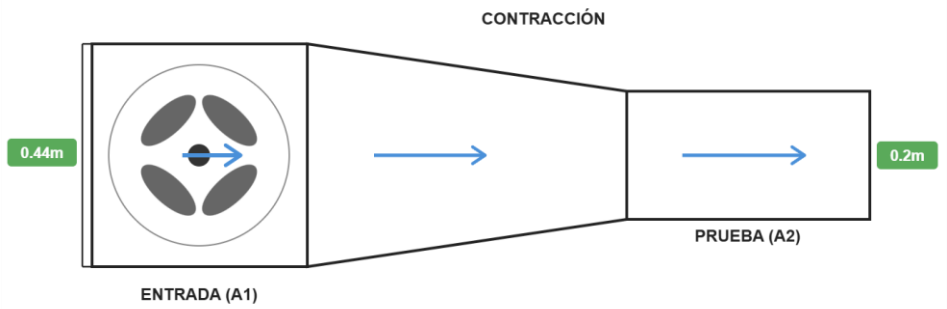
En esta sección se va a detallar los principales resultados obtenidos en este trabajo de integración curricular.

4.1 Diseño del túnel de viento

El presente diseño se estableció a partir del trabajo de Maldonado & Calle (2023). En base a estas medidas se adaptaron las secciones de entrada, contracción, cámara de pruebas y difusor, manteniendo las proporciones recomendadas para garantizar un flujo estable. En la figura 19 se observa cómo están constituidas las 3 primeras secciones del túnel, además de que en la sección de entrada se colocó una rejilla con el objetivo de estabilizar el flujo de aire que pasa a la sección de pruebas.

Figura 19

Diagrama túnel de viento



$$A1 = ancho * alto = 0.44\ m * 0.44\ m = 0.19\ m^2$$

$$A2 = s^2 = (0.2\ m)^2 = 0.04\ m^2$$

Para saber que velocidad hay en la cámara de pruebas se aplicó la ecuación de caudal para fluidos incompresibles:

$$Q1 = Q2$$

$$V1 * A1 = V2 * A2$$

$$V2 = \frac{V1 * A1}{A2}$$

$$V2 = \frac{V1 * 0.19\ m^2}{0.04\ m^2}$$

$$V2 = V1 * 4.75$$

Se calculó el número de Reynolds con la ecuación 3 para saber qué tipo de flujo se presentó en la sección de pruebas.

$$Re = \frac{\rho * v_s * D_h}{\mu}$$

$$Re = \frac{0.9358\ kg/m^3 * 10\ m/s * 0.2\ m}{1.7197x10^{-5}\ kg/(m * s)}$$

$$Re = 108832.936$$

Según la tabla 5, esta sección tuvo un flujo turbulento.

4.1.1 Sección de pruebas

Dimensiones de la sección de pruebas:

Velocidad de viento (v) = 10 [m/s]

Ancho = 200 [mm]

Alto = 200 [mm]

Largo (L) = 500 [mm]

Sección rectangular = 0.04 [m^2]

4.1.1.1 Cálculo del caudal necesario

Parámetro fundamental en el diseño del túnel para saber el caudal de aire que debe fluir dentro de la sección de pruebas que da paso a la selección del ventilador, se calculó con la ecuación 11.

$$Q = v2 * A2$$

$$Q = 10\ m/s * 0.04\ m^2$$

$$Q = 0.4\ m^3/s$$

4.1.1.2 Cálculo del flujo másico

Calculado con la ecuación 12

$$\dot{m} = \rho * Q$$

$$\dot{m} = 0.9358\ kg/m3 * 0.4\ m^3/s$$

$$\dot{m} = 0.37\ kg/s$$

4.1.1.3 Cálculo del factor "f" para pérdidas por fricción

$$f = \frac{0.25}{\left[log\left(\frac{1}{3.7(\frac{Dh}{\varepsilon})} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)\right]^2}$$

$$f = \frac{0.25}{\left[log\left(\frac{1}{3.7(\frac{0.2\ m}{3\ \text{x}\ 10 - 7\ \text{m}})} + \frac{5.74}{108832.936^{0.9}}\right)\right]^2}$$

$$f = 0.0175$$

$$h_{L\ mayor} = f\frac{Lv^2}{D_h 2g}$$

$$h_{L\ mayor} = 0.0175\frac{0.5m * (10\ m/s)^2}{0.2\ m * 2 * 9.8\ m/s^2}$$

$$h_{L\ mayor} = 0.223\ m$$

El flujo de aire reduce su energía en una cantidad equivalente a una altura de 0.213 m, es decir, es en una disminución de presión dentro de la sección de pruebas la cual se considera para mantener las condiciones adecuadas de ensayo aerodinámico.

4.1.2 Sección de contracción

4.1.2.1 Cálculo del número de Mach

$$M = \frac{v}{v_s}$$

$$M = \frac{10\ m/s}{331.672\ \text{m/s}}$$

$$M = 0.030$$

El resultado es menor a 0.7 lo que indica que se trata de un túnel de viento subsónico, bajo esta condición las variaciones de densidad del aire son mínimas, por lo que pueden despreciarse en el análisis, asumiendo una densidad constante.

4.1.2.2 Cálculo de la velocidad de entrada

Velocidad de salida (V2) = 10 m/s

Área de entrada (A1) = 0.19 m^2

Área de salida (A2) = 0.04 m^2

Se conoce que el flujo másico en un conducto en teoría será constante. Por lo que se debe cumplir la ecuación de continuidad con la ecuación 17.

$$\rho_1 * v_1 * A_1 = \rho_2 * v_2 * A_2$$

Como es un flujo incompresible, la densidad se omitió de la formula quedando:

$$v_1 * A_1 = v_2 * A_2$$

$$v_1 = \frac{10\ m/s * 0.04\ m^2}{0.19\ m^2}$$

$$v_1 = 2.11\ m/s$$

Este resultado concuerda con la afirmación de que, si la velocidad se multiplica por el área transversal de la entrada, tendremos el mismo caudal calculado para la sección de pruebas.

4.1.2.3 Cálculo de presiones

Siguiendo la ecuación 18, sin considerar la variable z ya que no existe altura.

$$P1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2$$

$$77470\ Pa + \frac{1}{2} * \left(0.9358 \frac{kg}{m^3}\right) * (2.11\ m/s)^2 = P2 + \frac{1}{2} * (0.9358\ kg/m^3) * (10\ m/s)^2$$

Donde el valor de V2 se obtiene del anemómetro y V1 del despeje de la ecuación de caudal, quedando:

$$P2 = 77470\ Pa + \frac{1}{2} * \left(0.9358 \frac{kg}{m^3}\right) * (2.11\ m/s)^2\ - \frac{1}{2} * \left(0.9358 \frac{kg}{m^3}\right) * (10\ \mathrm{m/s})^2$$

$$P2 = 77425.436\ \mathrm{Pa}$$

Se realizo la diferencia entre la presión de la entrada y de la sección de pruebas para comprobar que los cálculos concuerden con la teoría:

$$\Delta P = P1 - P2$$

$$\Delta P = 77470\ Pa - 77425.436\ Pa$$

$$\Delta P = 44.564\ Pa$$

Como la P2 disminuyo y su diferencia de presiones es de 44.564 Pa, se cumple la teoría: al reducir un área transversal aumenta la velocidad, pero se pierde presión. Este resultado indico que el dimensionamiento es correcto.

4.1.2.4 Cálculo de pérdidas por contracción

Con una velocidad de entrada de 2.11 m/s y salida de 10 m/s junto con un ángulo de contracción de 14° se obtuvo una pérdida de 0.466 m (46.6 cm), equivalente a 5.6 Pa.

$$\Delta P\ =\ Kc\ \times \left(\rho\ \times \frac{V_2^2}{2}\right)$$

$$Kc\ =\ 0.8\ \times\ sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \times\ (1\ -\ AR^2) = 0.0914$$

$$\Delta P\ = 5.6\ Pa$$

4.1.3 Difusor

A través de la ecuación 27, se estableció el valor del ángulo que debe tener el difusor.

$$\theta = arctan\left(\frac{1}{2} * \frac{\sqrt{A_r - 1}}{\frac{L}{D_h}}\right)$$

$$\theta = arctan\left(\frac{1}{2} * \frac{\sqrt{1.5 - 1}}{\frac{0.15}{0.2}}\right)$$

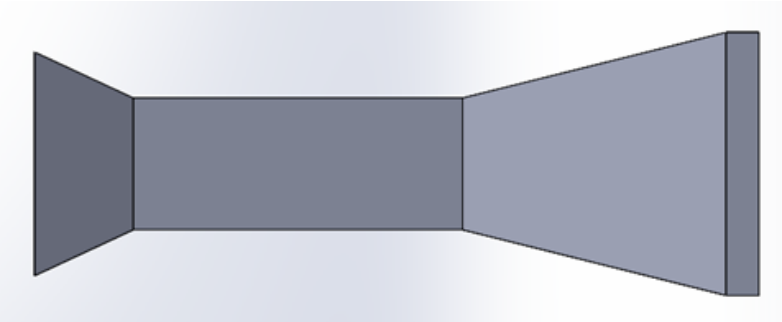
$$\theta = 25°$$

4.1.4 Diseño final propuesto

El diseño final del túnel de viento que se ve en la figura 20 consta de 4 secciones principales, optimizadas para garantizar un flujo de aire uniforme y controlado en la sección de pruebas.

Figura 20

Diseño final propuesto



4.2 Construcción del túnel de viento

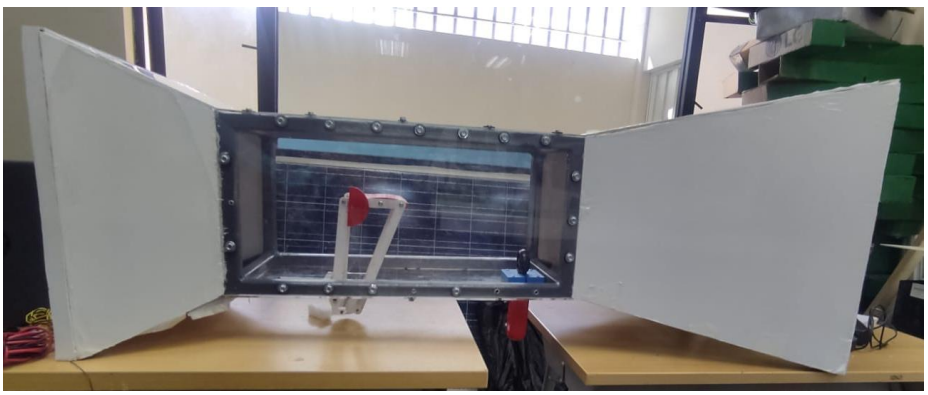
Se construyó un túnel de viento a escala laboratorio para la evaluación aerodinámica de perfiles eólicos.

4.2.1 Estructura general del sistema

En la figura 21 se observa la estructura general del túnel de viento construido, el cual cuenta con un sistema de impulsión de aire, la sección de entrada y la cámara de pruebas. Fue diseñada para proporcionar rigidez mecánica y minimizar vibraciones durante su funcionamiento con el fin de garantizar una mayor estabilidad en las pruebas experimentales y un fácil acceso a la sección de pruebas para la instalación del perfil aerodinámico a estudiar.

Figura 21

Estructura general del sistema

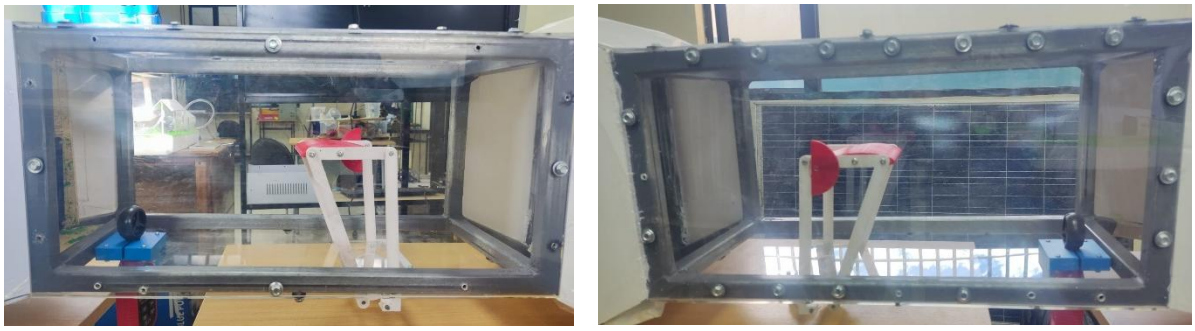


4.2.2 Sección de pruebas

Esta sección es el componente principal del túnel de viento, donde se realiza la evaluación aerodinámica. En la figura 22 se presenta la configuración implementada para esta sección, la cual fue diseñada para permitir la visualización y análisis del flujo alrededor del perfil NACA estudiado.

Figura 22

Sección de pruebas



(a) Lado izquierdo **(b) Lado derecho**

El funcionamiento de la sección de pruebas consiste en dirigir el flujo de aire impulsado por el ventilador a través de una sección cerrada donde se generan variaciones de velocidad las cuales son detectadas por un anemómetro digital UT363BT, presión y ángulos de ataque sobre el perfil aerodinámico con el objetivo de minimizar posibles perturbaciones que puedan afectar la precisión de los resultados experimentales, las cuales permiten analizar los parámetros de sustentación, arrastre y formación de estelas turbulentas. Por último, esta sección permite la instalación y reemplazo de distintos perfiles aerodinámicos favoreciendo el desarrollo de varios ensayos en distintas condiciones de operación.

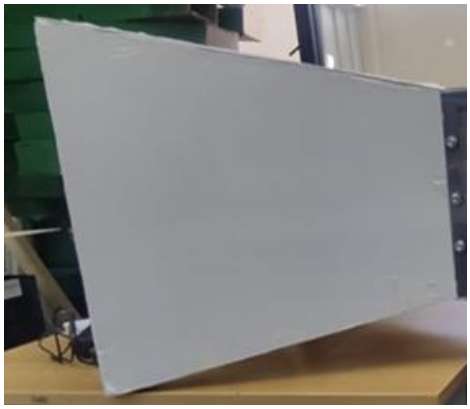
4.2.3 Sección de contracción y difusor

En la figura 23 se muestran que la sección de contracción y el difusor respectivamente se construyeron a partir de los cálculos realizados anteriormente los cuales facilitan un área

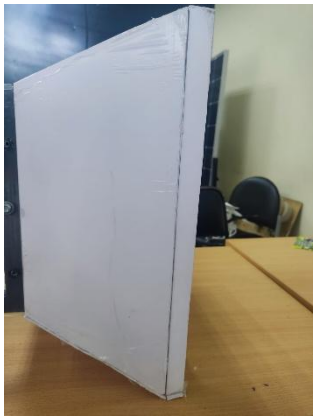
adecuada de entrada para el sistema de generación de viento y un área adecuada para la **d**escarga del flujo.

Figura 23

Sección de contracción y difusor



a) Contracción



b) Difusor

4.2.4 Sistema de generación de viento

Para la generación de flujo de aire se incorporó un ventilador AC modelo FD1238A1HS junto con un variador de velocidad para controlar las diferentes condiciones de análisis a 3, 4 y 5 m/s.

Figura 24

Fuente de generación de viento



4.3 Análisis CFD

En esta sección se abordarán los principales resultados obtenidos de la simulación aerodinámica en CFD mediante la variación de parámetros de diseño y geométricos. Además,

se discute de forma detallada los hallazgos más relevantes del diseño y análisis aerodinámico del perfil NACA 6412.

4.3.1 Validación del Modelo CFD

Los valores de Cd obtenidos fueron analizados en función de los parámetros de la tabla 10, permitiendo observar una tendencia consistente con el estudio de referencia y en términos generales, se evidencio un excelente resultado como se ve en la tabla 12.

Tabla 12

Resultados de validación

Parámetros	**Berger et al. (2024)**	**Presente estudio**	**% error**
Perfil aerodinámico	NACA 6412	NACA 6412	
Densidad del aire	1.225 [kg/m^3]	1.225 [kg/m^3]	
Velocidad de entrada	10 [m/s]	10 [m/s]	
Viscosidad dinámica	1.7894×10^{-5} [kg/m*s]	1.7894×10^{-5} [kg/m*s]	
Ángulo de ataque	0 [°]	0 [°]	
Model Solutions	Spalart – Allmaras	Spalart – Allmaras	
Face Meshing	Cuadrilátera	Triangular	
Residual	10^{-6}	$10^{-10} – 10^{-12}$	
Coeficiente de arrastre (Cd)	0.03	0.03	0
Coeficiente de sustentación (Cl)	0.624	0.404	35.26
Calidad aerodinámica (**ε)**	0.048	0.078	62.5

En la tabla 12 se muestra que el modelo CFD de acuerdo al porcentaje de error, se predice correctamente el coeficiente de arrastre, pero subestima significativamente la sustentación y sobreestima la calidad aerodinámica. Esto sugiere que, aunque el modelo es

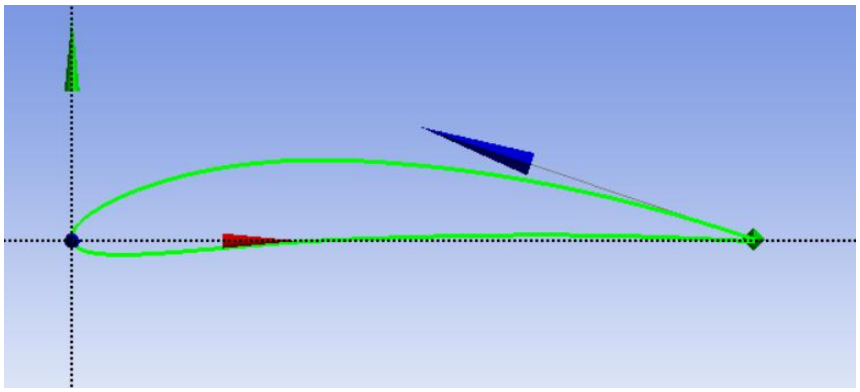
válido para estudios de resistencia requiere mejoras como el refinamiento de mallado o uso de mallado cuadrilátero para predecir con precisión la sustentación del perfil NACA 6412.

4.3.2 Generación de geometría y mallado

Para la generación de la geometría 2D como se ve en la figura 25, se importaron las coordenadas del perfil NACA 6412 desde la página Airfoil Tools al apartado de "Geometry" del sistema de análisis "Fluid Flow (Fluent)" en el Workbench de Ansys Fluent. Se logro la convergencia de la malla con un tamaño de 799929 elementos, conseguido con un "element size" exterior de 25 mm, de 1 mm en "Face sizing" y de 0.5 mm en "Edge sizing", lo que nos permitió conseguir buenos resultados en la simulación de fuerzas y coeficientes aerodinámicos.

Figura 25

Geometría del perfil NACA 6412 2D



4.3.3 Simulación CFD

Se realizo un análisis inicial con un ángulo de ataque de 0° a diferentes velocidades para elegir la más apta para la simulación. Luego de identificar dicha velocidad, se hizo el análisis con diferentes ángulos de ataque para identificar el ángulo óptimo, y finalmente con un ángulo de ataque óptimo establecido se analizó el perfil a diferentes velocidades de viento.

4.3.2.1 Selección de la velocidad

Para determinar la velocidad de operación más adecuada para la experimentación en el túnel de viento, se evaluó el comportamiento aerodinámico del perfil a un ángulo de ataque de

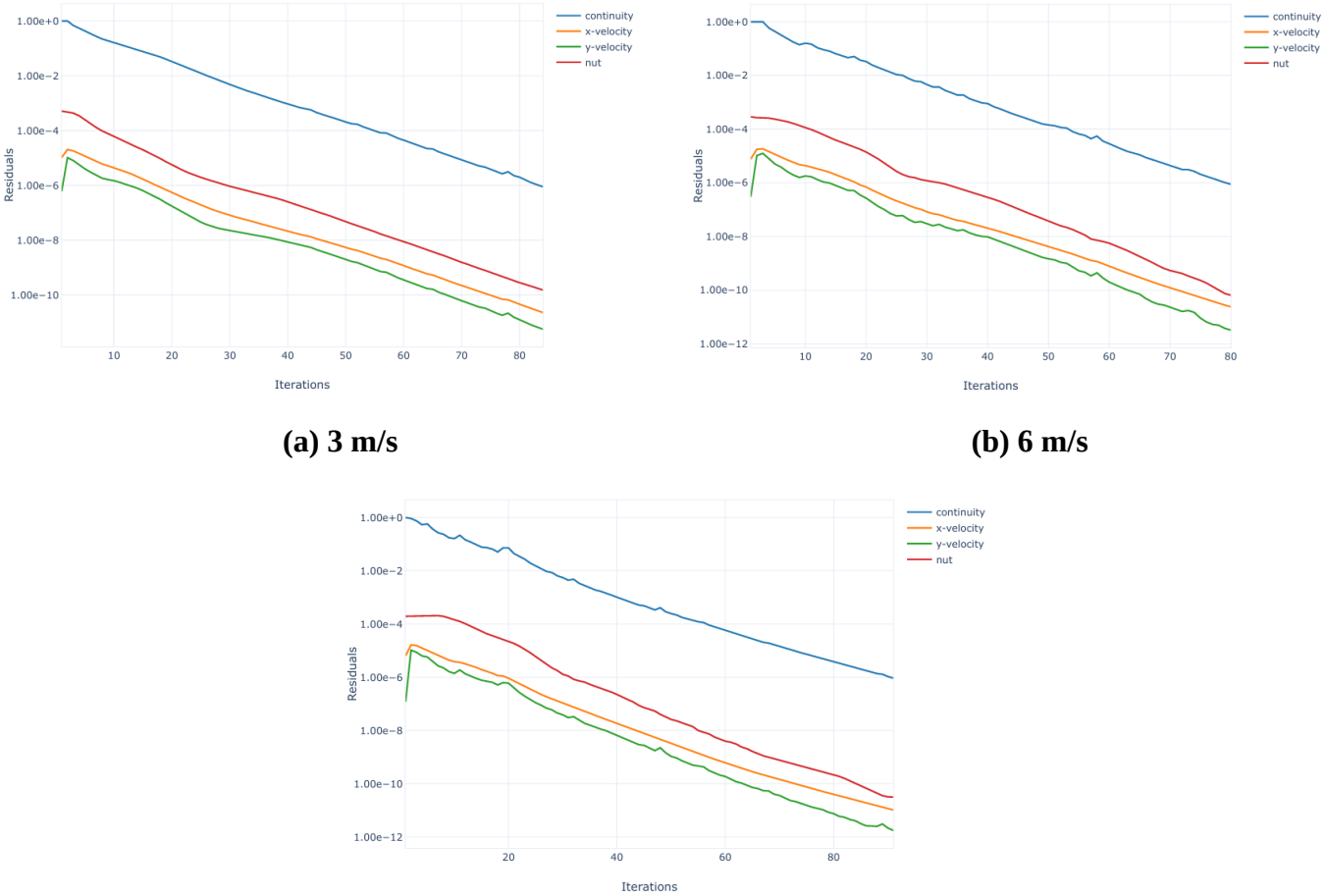
0° bajo 3 velocidades de viento: 3, 6 y 10 m/s. Se analizaron los residuales y coeficientes de arrastre y sustentación de cada velocidad para su selección, como se muestra a continuación:

Residuales

En la figura 26 se observa que todos los residuales de este análisis a diferentes velocidades alcanzaron valores de 10^{-10} a 10^{-12} lo cual indica que es una convergencia satisfactoria y por lo tanto los valores de Cd y Cl obtenidos son cercanos a la realidad.

Figura 26

Convergencia de residuales por velocidad de análisis



(a) 3 m/s **(b) 6 m/s**

(c) 10 m/s

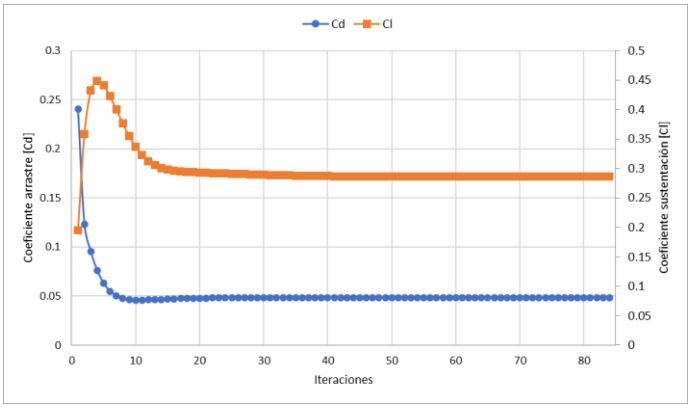
Coeficientes aerodinámicos

En la figura 27 se muestra que los coeficientes de arrastre y sustentación en función de las iteraciones para las 3 velocidades analizadas tienen un comportamiento esperado de

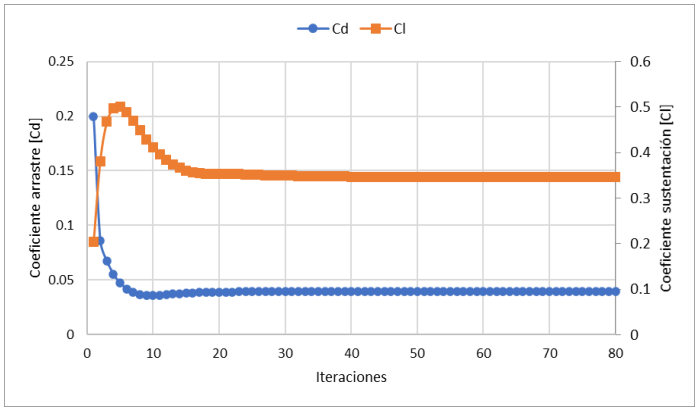
convergencia, se observa que mientras el coeficiente de arrastre se mantiene en un valor bajo al estabilizarse, el coeficiente de sustentación por el contrario se incrementa al aumentar la velocidad de flujo, mostrando un comportamiento físico acorde a la teoría aerodinámica.

Figura 27

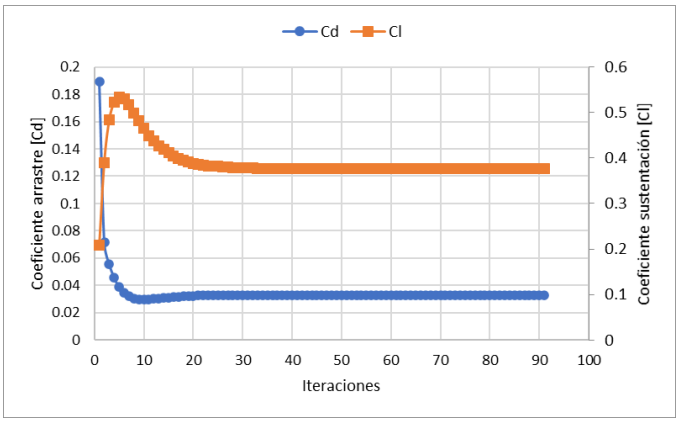
Cd y Cl por velocidad de análisis



(a) 3 m/s



(b) 6 m/s



(c) 10 m/s

Se escogió la velocidad de 10 m/s debido que después de comparar los coeficientes aerodinámicos y la convergencia numérica obtenida a 3, 6 y 10 m/s. Los resultados mostraron que 10 m/s presenta mayor estabilidad en los residuales y mejor calidad según la tabla 13. Adicionalmente, esta velocidad es representativa del rango operativo de túneles de viento educativos y resulta técnicamente viable para las capacidades del equipo disponible.

Tabla 13

Calidad aerodinámica a velocidades de 3, 6 y 10 m/s

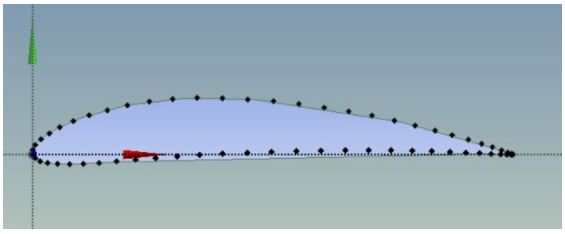
Velocidad [m/s]	Cd	Cl	ε
3	0.04853076	0.286102401	0.169627236
6	0.039522984	0.346521284	0.114056441
10	0.032906625	0.376045497	0.087507031

4.3.2.2 Variación y selección del ángulo de ataque óptimo

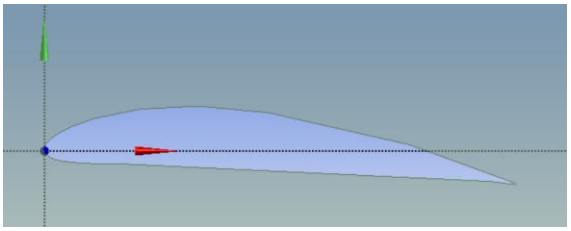
Una vez establecida la velocidad de trabajo de 10 m/s, se evaluó el comportamiento del perfil frente a 5 diferentes ángulos de ataque: 4°, 8°, 12° y 16° indicados en la figura 28. Con el objetivo de identificar qué ángulo de ataque da una mejor relación sustentación-arrastre, es decir, una mejor calidad aerodinámica.

Figura 28

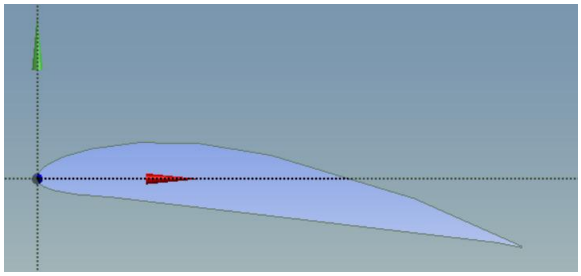
Geometría del perfil de acuerdo al ángulo de ataque



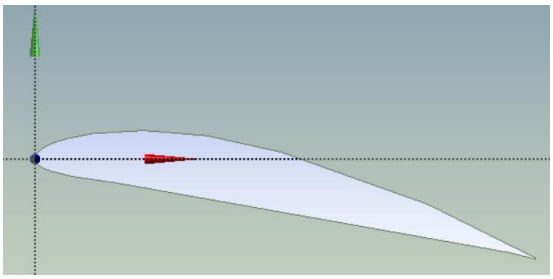
a) Geometría a 0° (Referencia plano XY)



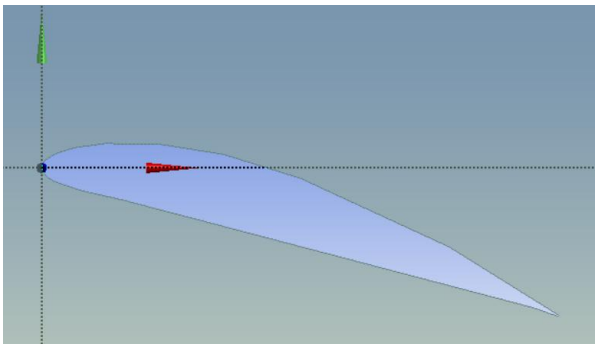
b) Geometría a 4°



c) Geometría a 8°



d) Geometría a 12°

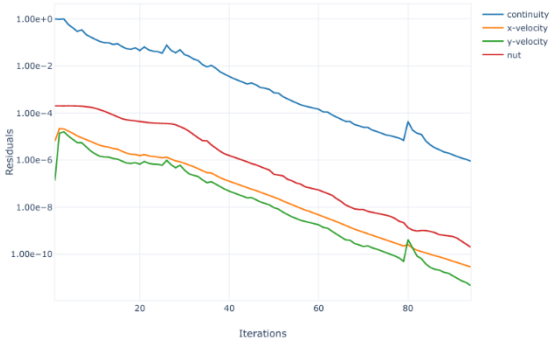


e) Geometría a 16°

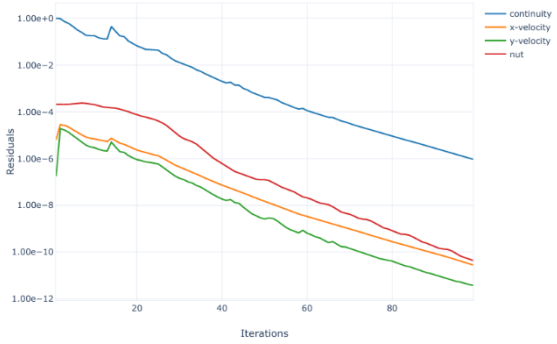
En cuanto a los residuales, en la figura 29 se observa que mientras más aumenta el ángulo de ataque (12° y 16°) mayor es el comportamiento oscilatorio, pero logra converger menos a 16° donde muestra un patrón, pero no llega a converger. Es decir que, a pesar de la naturaleza inestable del flujo, los coeficientes aerodinámicos Cl y Cd lograron converger y estabilizarse para validar los resultados obtenidos.

Figura 29

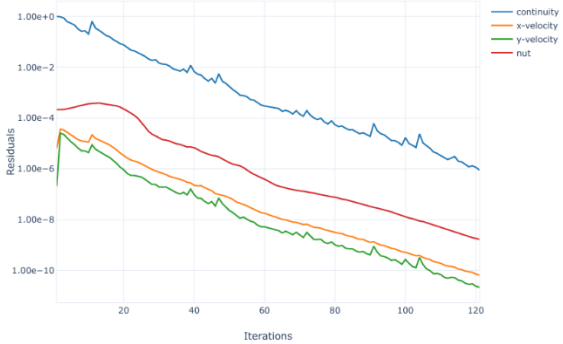
Comparación de residuales



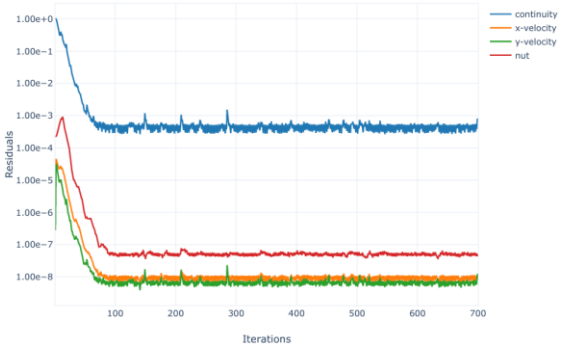
a) α = 4°



b) α = 8°



c) α = 12°



d) α = 16°

Una vez verificada la convergencia de las simulaciones mediante el análisis de residuales, en la tabla 14 se presentan los coeficientes aerodinámicos junto con la calidad aerodinámica para cada ángulo de ataque. Esto permitió identificar el ángulo de ataque óptimo, es decir, el que tiene un mejor desempeño aerodinámico tomando en cuenta que la calidad se evalúa de 0 a 1, entre más se acerque a 0 es mejor.

Tabla 14

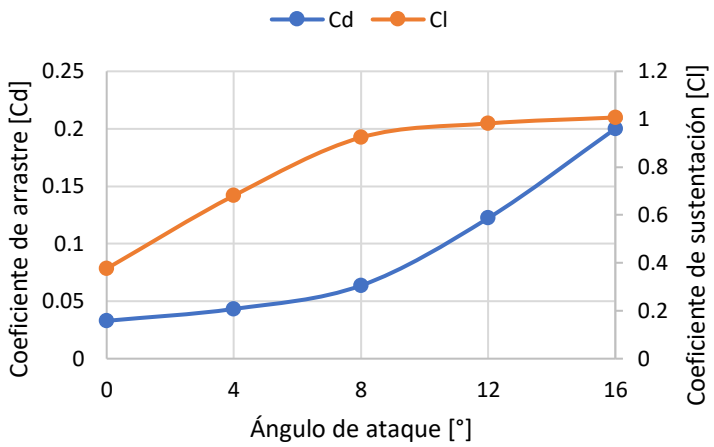
Coeficientes aerodinámicos en función del ángulo de ataque

Angulo de ataque [°]	**Cd**	**Cl**	$\boldsymbol{\varepsilon}$
0	0.03290662	0.3760455	0.08750703
4	0.04324729	0.68096414	0.06350891
8	0.06362451	0.92378597	0.06887365
12	0.12221924	0.98218522	0.12443604
16	0.20008267	1.007082	0.19867565

Cumpliendo esta condición, el ángulo de ataque óptimo identificado es de 4°. Para analizar más a fondo, en la figura 30 se muestra la evolución de Cl y Cd frente al ángulo de ataque. Se puede ver que hasta 4° estos coeficientes mantienen un crecimiento eficiente, sin embargo, desde los 8° en adelante el arrastre presenta un crecimiento exponencial debido a la separación progresiva del flujo. Este fenómeno físico es por el cual la eficiencia aerodinámica baja al tener ángulos de ataque altos, ya que, a pesar de tener una mayor sustentación, el incremento desproporcionado del arrastre da como resultado un valor más cercano a uno, es decir, con menor calidad.

Figura 30

Cd y Cl vs Ángulo de ataque



Resultados análisis CFD con ángulo de ataque 4°

En la figura 31 se observa que en el borde de ataque se genera un punto de estancamiento donde la velocidad se aproxima a cero; al fluir por el extradós (parte superior del perfil) se ve que el aire llega a una velocidad máxima alrededor de 13.79 m/s debido a la curvatura del perfil, representada con colores rojo – naranja en la zona central, en el intradós (parte inferior del perfil) predomina un tono amarillo bajo representando una baja velocidad y detrás del borde de salida se observa una estela de color azul – verde que indica la zona donde el flujo se desacelera y se mezcla. Esta aceleración en el extradós es la responsable de generar baja presión en el mismo, esta baja presión combinada con la alta presión que se genera en el intradós donde el aire, crea una diferencia de presiones que se ve claramente en la figura 32 donde el color azul representa la baja presión y el color rojo – naranja representa la alta presión, confirmando que el gradiente de presión desde el borde de ataque hasta el borde de salida es el responsable de la fuerza de sustentación.

Figura 31

Análisis de velocidad a 4°

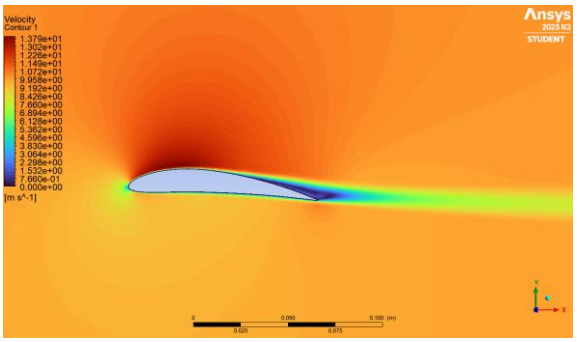
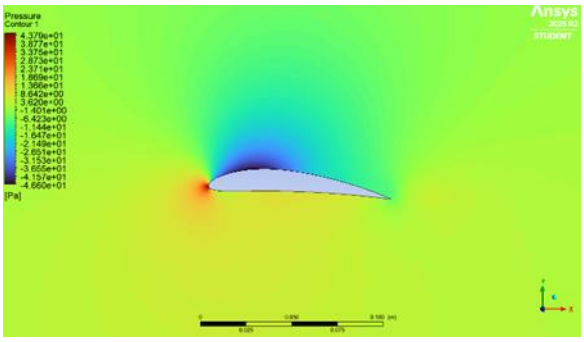


Figura 32

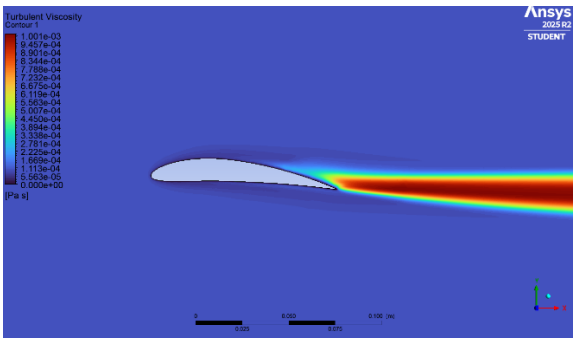
Análisis de presión a 4°



Finalmente, el análisis de viscosidad turbulenta en la figura 33 muestra que al tener el perfil un ángulo de ataque bajo (4°) la turbulencia se mantiene principalmente en la estela detrás del perfil, representada por una franja de tono rojo – amarillo que va extendiéndose desde el borde de salida. Esta zona muestra la perdida de energía por fricción interna y es la manifestación directa de la resistencia aerodinámica generada; al no haber un desprendimiento masivo del flujo sobre la superficie superior, se confirma que el perfil opera en un régimen aerodinámico eficiente.

Figura 33

Análisis de turbulencia a 4°



Resultados análisis CFD con ángulo de ataque 8°

La figura 34 muestra que en el borde de ataque se genera un punto de estancamiento donde la velocidad se aproxima a cero; al fluir por el extradós se ve que el aire llega a una velocidad máxima de 14.84 m/s, superando ligeramente la velocidad de 13.79 m/s a 4°,

representada con colores rojo – naranja en la zona central, en el intradós predomina un tono amarillo bajo representando una baja velocidad y detrás del borde de salida se observa una estela de color azul – verde que indica la zona donde el flujo se desacelera y se mezcla. Esta mayor velocidad genera una baja presión más intensa llegando a -61.66 Pa como se ve en la figura 35. Mientras que, en el intradós la presión aumenta significativamente en comparación con la distribución de presiones a 4° y por consecuencia aumentando el valor de sustentación.

Figura 34

Análisis de velocidad a 8°

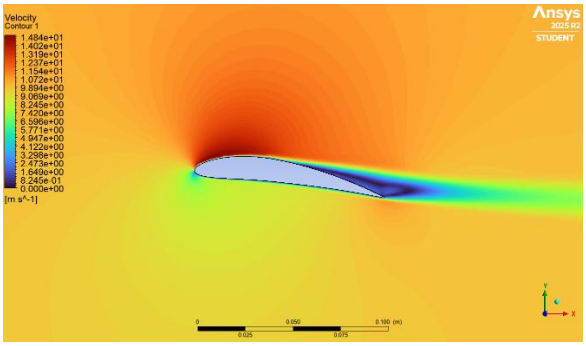
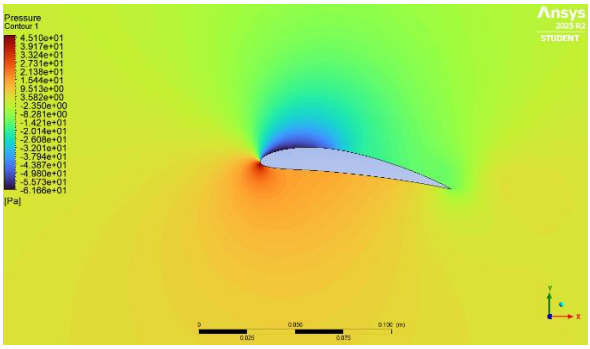


Figura 35

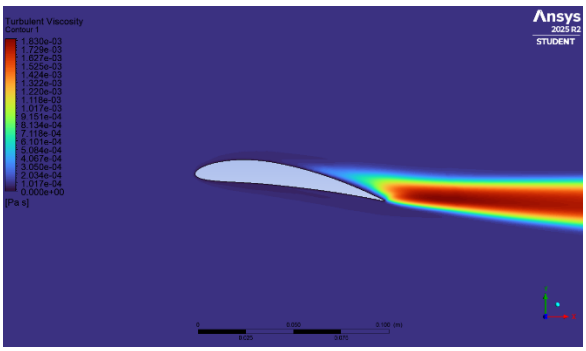
Análisis de presión a 8°



Por último, en la figura 36 se observa que la estela turbulenta se vuelve más ancha e intensa evidenciando una mayor pérdida de energía por fricción interna y, por lo tanto, un ligero aumento de la resistencia aerodinámica. Sin embargo, a pesar de este aumento, no se observan zonas rojas sobre el extradós lo que quiere decir que el perfil aun opera en régimen aerodinámico eficiente, pero con mayores valores de arrastre y sustentación comparado con el ángulo de 4°.

Figura 36

Análisis de turbulencia a 8°



Resultados análisis CFD con ángulo de ataque 12°

La figura 37 muestra que en el borde de ataque se genera un punto de estancamiento donde la velocidad se aproxima a cero; al fluir por el extradós se ve que el aire llega a una velocidad máxima de 15.7 m/s, superando las velocidades a 4° y 8°, representada con colores rojo – naranja en la zona central, en el intradós predomina un tono amarillo bajo representando una baja velocidad y detrás del borde de salida predominan los tonos azul – celeste difuminándose a un color amarillo verdoso, lo que refleja una gran disminución de la velocidad en la estela asociado a pérdidas de energía y generación de arrastre, la intensidad del azul indica que hay una desaceleración considerable del flujo y una posible separación leve de la capa limite. Sin embargo, la transición progresiva de estos colores significa que el flujo se desarrolla de forma relativamente estable. En la figura 38 se identifica una zona de alta presión (borde de ataque) mientras que en el extradós se presenta una fuerte disminución de presión que favorece la sustentación, al contrario del intradós en donde las presiones llegan hasta -93.84 Pa. Mientras tanto en la parte posterior muestra una recuperación parcial de la presión, asociada a la estela y al arrastre.

Figura 37

Análisis de velocidad a 12°

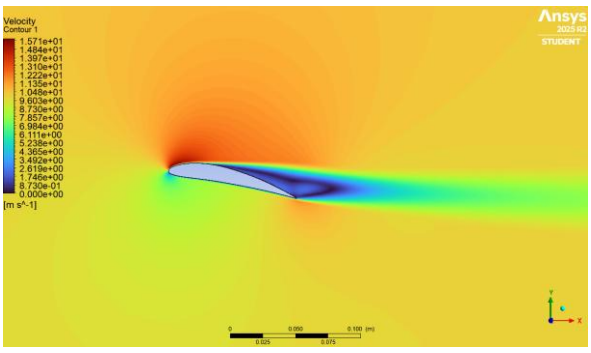
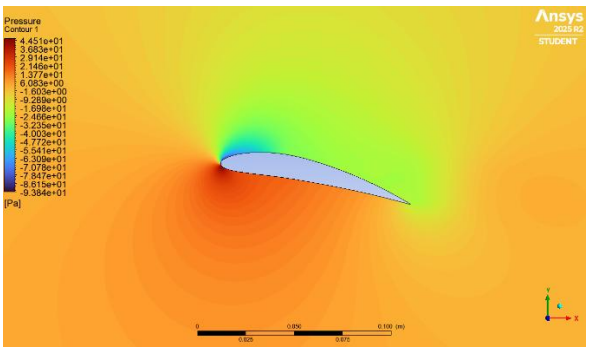


Figura 38

Análisis de presión a 12°

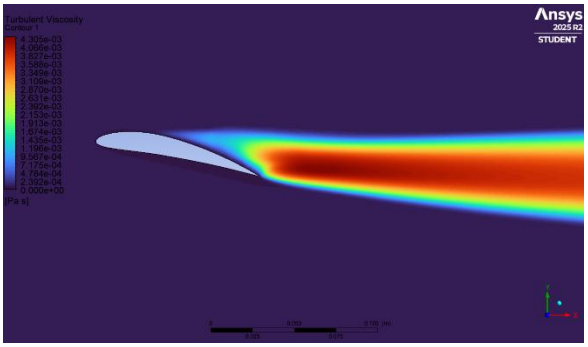


En cuanto a la viscosidad turbulenta alrededor del perfil, en la figura 39 se muestra una estela más marcada indicando una gran difusión turbulenta e incremento de arrastre lo que se evidencia en la tabla 14. La capa limite inicia en estado laminar en el borde de ataque, luego se

engrosa y entra en régimen turbulento a lo largo del perfil, y finalmente presenta una alta turbulencia en el borde de salida generando una amplia estela que eleva la disipación de energía.

Figura 39

Análisis de turbulencia a 12°



Resultados análisis CFD con ángulo de ataque 16°

El comportamiento de la velocidad alrededor del perfil en la figura 40 muestra una velocidad máxima de 15.8 m/s que en comparación con la figura 37 se mantiene relativamente constante. No obstante, la distribución de velocidades tiene ligeras variaciones en especial detrás del borde de salida, donde la estela es más pronunciada en comparación a las demás, contando con una mayor área de tonos azul oscuro intensos y alargados evidenciando una mayor disminución de velocidad y, por lo tanto, mayor pérdida de energía, lo que da paso al incremento del arrastre. En el análisis de presión, entre las figuras 38 y 41 no hay mucha diferencia ya que, en el extradós, los valores que se presentan son relativamente los mismos, pero en el intradós se refleja un aumento de 93.84 Pa 106.7 Pa, lo que hace que incremente ligeramente la sustentación.

Figura 40

Análisis de velocidad a 16°

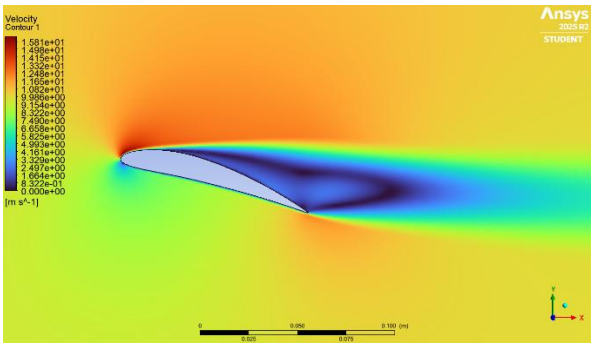
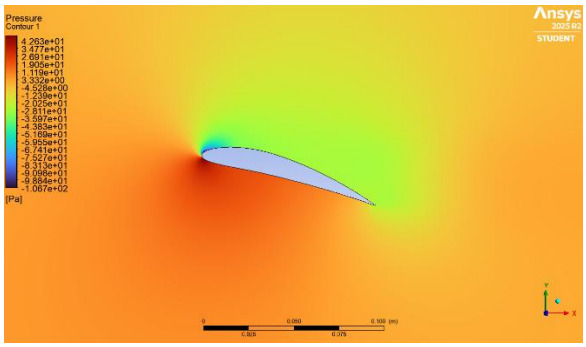


Figura 41

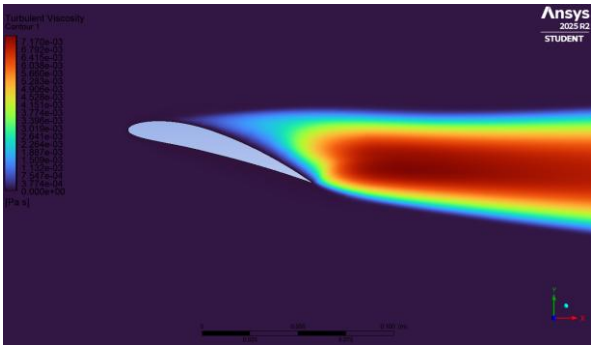
Análisis de presión a 16°



En la figura 42 se muestra una estela con altos niveles de viscosidad turbulenta con tonos rojo – naranja que se extiende desde el borde de salida evidenciando una intensa cantidad de movimiento y por lo tanto un aumento de arrastre casi al doble en comparación con la figura 39. La capa limite inicia en régimen laminar, incrementa progresivamente y alcanza su máxima intensidad en el borde de salida hacia atrás, indicando la perdida de adherencia al flujo y una separación leve – moderada de la capa limite, lo que hace que la estela sea más ancha a comparación de los análisis anteriores y por lo tanto disminuya el desempeño aerodinámico del perfil.

Figura 42

Análisis de turbulencia a 16°



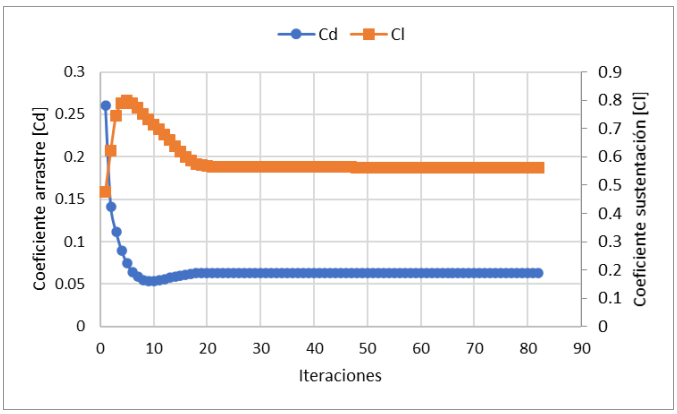
4.3.2.3 Análisis a diferentes velocidades de viento

Luego de identificar el ángulo de ataque óptimo de 4° del perfil NACA 6412, se analizó el comportamiento del mismo bajo diferentes velocidades de viento: 3, 6 y 10 m/s con

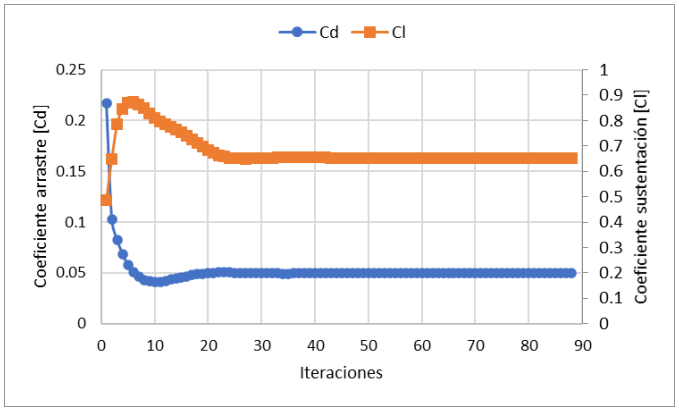
el objetivo de caracterizar la respuesta del perfil frente a estos cambios y verificar su rendimiento en un rango de velocidades en aplicaciones prácticas. Mediante los coeficientes Cl y Cd junto con análisis de velocidad, presión, turbulencia y SDR como se indica a continuación:

Figura 43

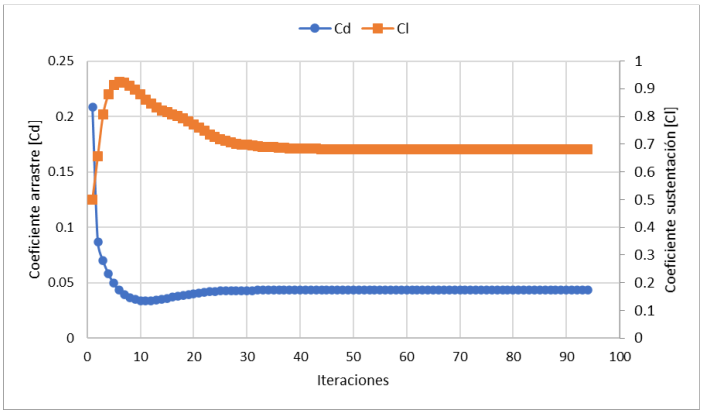
Cd y Cl a diferentes velocidades de viento



(a) 3 m/s



(b) 6 m/s



(c) 10 m/s

La tabla 15 contiene un resumen del análisis de los coeficientes de arrastre y sustentación con un ángulo óptimo de 4° en función del aumento de la velocidad de viento. Estos datos mostraron el crecimiento de los coeficientes aerodinámicos y la mejora de la calidad aerodinámica en función del aumento de la velocidad.

Tabla 15

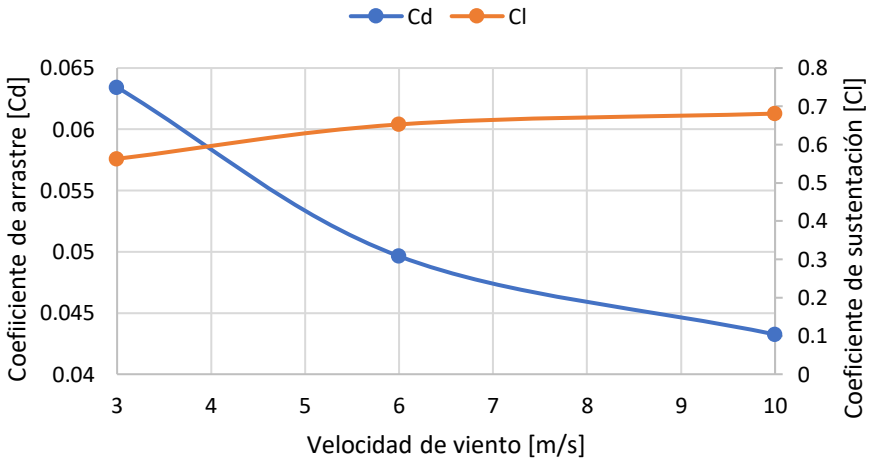
Coeficientes aerodinámicos en función de la velocidad del aire para α = 4°

Velocidad [m/s]	Cd	Cl	ε
3	0.06342645	0.5628015	0.11269773
6	0.04963656	0.6526879	0.07604945
10	0.04324729	0.68096414	0.06350891

Estos datos pueden observarse en la figura 44, donde el coeficiente de sustentación incrementa progresivamente con la velocidad, pasando de 0.5628 a 0.6810 entre 3 y 10 m/s, mientras que el coeficiente arrastre disminuye de 0.0634 a 0.0432 en el mismo rango de velocidades. Siendo este un comportamiento conveniente para aplicaciones en aerogeneradores, ya que una mejor calidad aerodinámica es una condición clave para aumentar la extracción de energía eólica.

Figura 44

Gráfica Cd y Cl vs velocidad de viento



Resultados análisis CFD con velocidad de 3 m/s

El comportamiento de la velocidad alrededor del perfil en la figura 45 tiene un comportamiento esperado ya que en el borde de ataque se genera un punto de estancamiento y

en el extradós muestra una velocidad máxima de 3.95 m/s. Sin embargo, la distribución de velocidades tiene ligeras variaciones detrás del borde de salida, donde hay una pequeña estela evidenciando una disminución de velocidad entre 0 – 1 m/s y por lo tanto pérdida de energía, lo que da paso al incremento del arrastre. En el análisis de presión de la figura 46, el extradós llega a valores de -3,54 Pa y en el intradós llega 6.83 Pa, lo que tiene relación directa con la distribución de velocidades, favoreciendo la generación de sustentación y eficiencia del perfil.

Figura 45

Análisis de velocidad a 4°

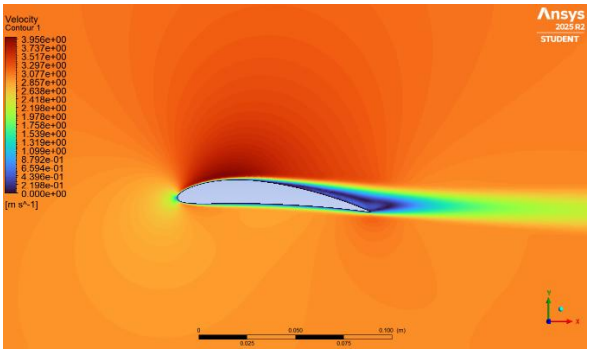
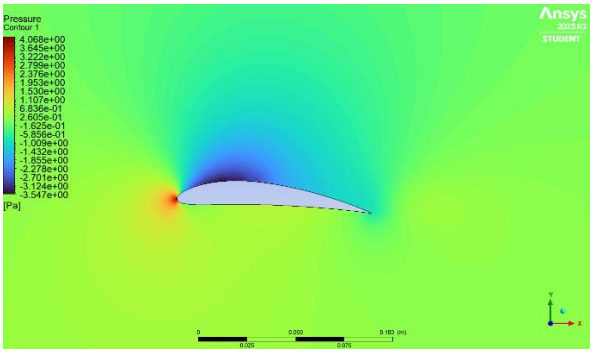


Figura 46

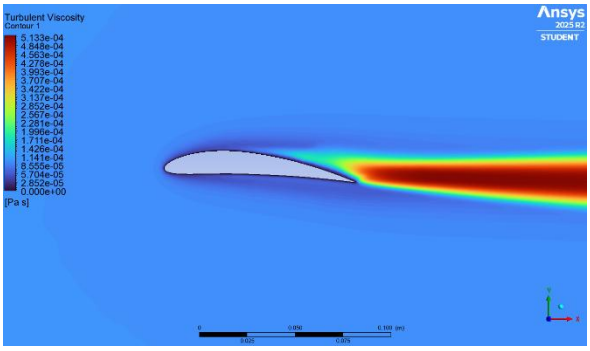
Análisis de presión a 4°



El análisis de viscosidad turbulenta en la figura 47 muestra que el flujo libre permanece relativamente estable y adherido sobre la superficie del perfil, sin indicio de separación masiva de la capa limite, lo que no afecta al rendimiento del perfil. La estela que se desarrolla detrás del borde de salida es donde se forma la mayor turbulencia indicando que esta zona tiene presencia de pérdidas aerodinámicas asociadas principalmente al arrastre viscoso del perfil.

Figura 47

Análisis de turbulencia a 4°



Resultados análisis CFD con velocidad de 6 m/s

El análisis de velocidad de la figura 48 muestra un punto de estancamiento esperado en el borde de ataque, en el extradós la velocidad llega hasta 8.17 m/s y detrás del borde de salida se ve una pequeña estela evidenciando una variación de velocidades entre 0 y 4.54 m/s lo que da paso a pérdidas de energía e incremento de arrastre. En la figura 49 la presión en el extradós llega a -16.04 Pa y a -0.0851 Pa en el intradós, esta variación de presiones al ser mayor en el intradós favorece al rendimiento del perfil por generar más sustentación.

Figura 48

Análisis de velocidad a 8°

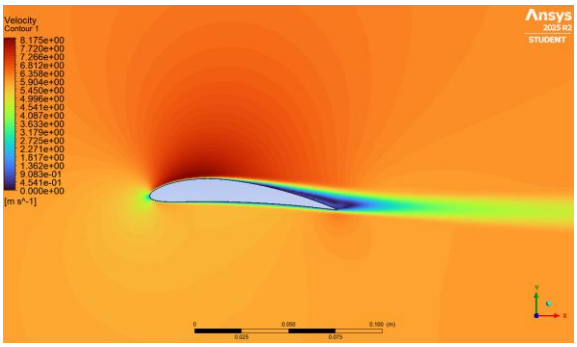
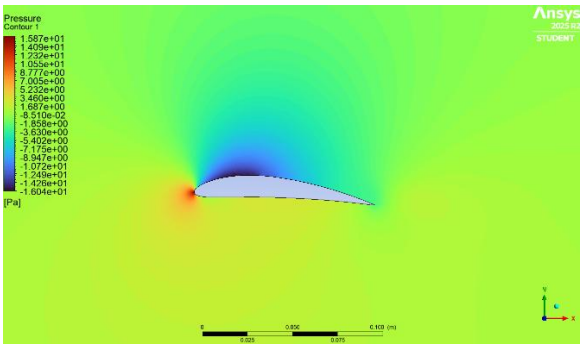


Figura 49

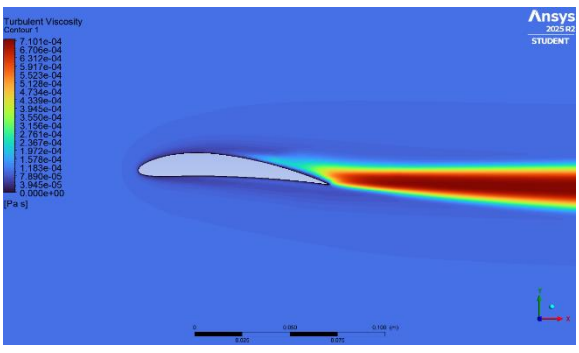
Análisis de presión a 8°



Por último, en el análisis de viscosidad turbulenta de la figura 50 se observa una baja concentración de viscosidad turbulenta en la estela detrás del borde de salida. Este comportamiento indica un flujo estable y adherido con una mínima separación de la capa limite, además, esta estela bien definida evidencia un adecuado desarrollo del flujo favoreciendo al desempeño del perfil.

Figura 50

Análisis de turbulencia a 8°



4.3.4 Análisis aerodinámico

4.3.4.1 Parámetros aerodinámicos

Las fuerzas aerodinámicas L y D fueron obtenidas de la simulación en ANSYS Fluent considerando el criterio de Berger et al. (2024). Sin embargo, con el fin de representar las condiciones reales de operación del túnel de viento se calcularon las mismas fuerzas con las ecuaciones 5 y 6, pero tomando en cuenta el área física del modelo experimental lo cual nos permitió obtener los valores reales de las mismas, obteniendo una caracterización más representativa del comportamiento aerodinámico del perfil NACA 6412 bajo condiciones físicas de ensayo como se ve en la tabla 16. En esta tabla se observa que ambas fuerzas aumentan en conjunto al ángulo de ataque, en especial la sustentación que presenta un crecimiento significativo de 1.759 N en 0° a 4.712 N en 16° y, por otro lado, el arrastre aumenta de 0.153 N a 0.936 N indicando una mayor resistencia aerodinámica a altos ángulos de incidencia.

Igualmente, los valores reales de L y D conservan esta misma tendencia, por lo que en términos de eficiencia aerodinámica se confirma nuevamente que el ángulo de ataque que presento el comportamiento más favorable es 4° y a partir de 8° el marcado aumento de arrastre redujo progresivamente la calidad aerodinámica del perfil.

Tabla 16

L y D vs ángulo de ataque

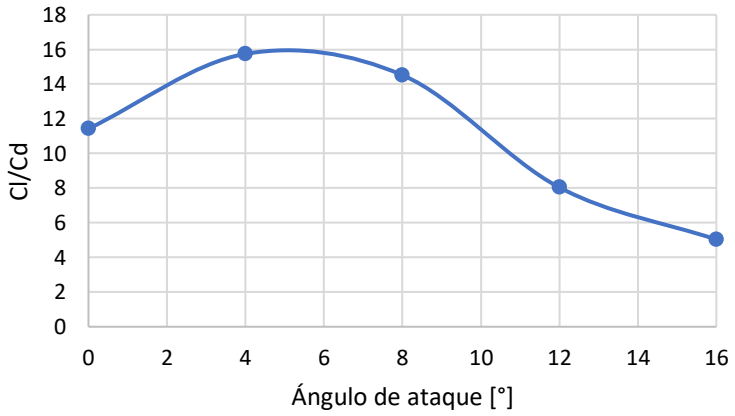
Alfa [°]	D [N]	L [N]	D real [N]	L real [N]
0	0.1539701	1.759516907	0.01539701	0.175951688
4	0.20235408	3.18623126	0.020235408	0.318623121
8	0.297699102	4.322394616	0.02976991	0.432239455
12	0.571863821	4.595644701	0.057186381	0.459564463
16	0.936186812	4.712136748	0.09361868	0.471213668

4.3.4.2 Calidad aerodinámica

De acuerdo a Gonzales & Gonzales (2025) la relación entre sustentación y arrastre muestra que tan bien funciona un perfil en términos de aerodinámica. Una alta relación Cl/Cd en un perfil aerodinámico favorece a la fuerza útil que hace girar el rotor, al mismo tiempo que disminuye las pérdidas asociadas a la fricción y a las turbulencias del flujo, ya que expresa cuanta sustentación se obtiene por cada unidad de arrastre. Por lo que, determinar un ángulo de ataque óptimo permite mantener un flujo de aire estable, evitar la separación del flujo y reducir el rendimiento aerodinámico. En la figura 51 se muestra el comportamiento de la calidad en función del ángulo de ataque, donde hay un incremento progresivo de 11.427 en 0° hasta alcanzar un valor máximo entre los ángulos 4° - 6° alrededor de 15.745, indicando que en este rango el perfil NACA 6412 presenta una mejor eficiencia aerodinámica dado que la sustentación aumenta en mayor proporción que el arrastre. Posteriormente, a partir de 8°, la calidad presenta una disminución considerable llegando hasta valores de 5.033 a 16° evidenciando un aumento del arrastre y gran pérdida de eficiencia del perfil asociada al inicio de separación de flujo.

Figura 51

Calidad aerodinámica [Cl/Cd] vs ángulo de ataque

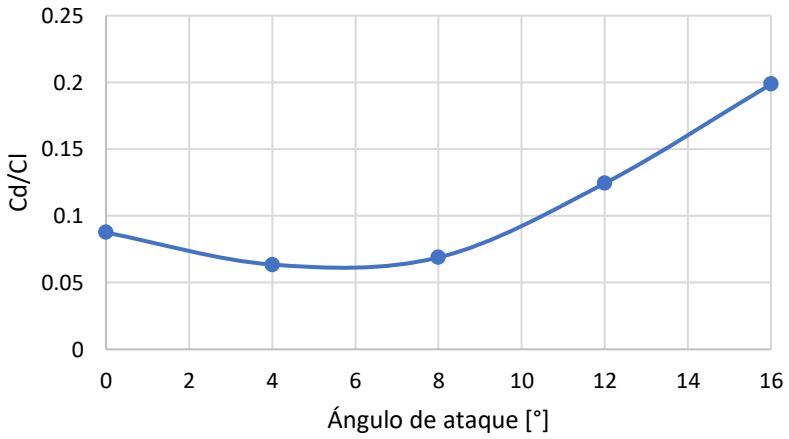


Por otro lado, Prieto (2016) en su libro Máquinas e Instalaciones Hidráulicas y Eólica muestra la calidad en una relación Cd/Cl, la cual expresa cuanto arrastre se genera por cada

unidad de sustentación, por lo que valores menores indican una mejor eficiencia y desempeño del perfil aerodinámico. En la figura 52 se muestra el comportamiento de la calidad en función del ángulo de ataque, donde tiene un descenso de 0.087 a 0.063 entre 0° a 4° y desde 4° en adelante aumenta rápidamente hasta llegar a 0.334, es decir que alrededor de 4° - 6° el perfil NACA 6412 presenta una mejor eficiencia aerodinámica a comparación de los demás ángulos donde hay una pérdida de eficiencia aerodinámica del perfil.

Figura 52

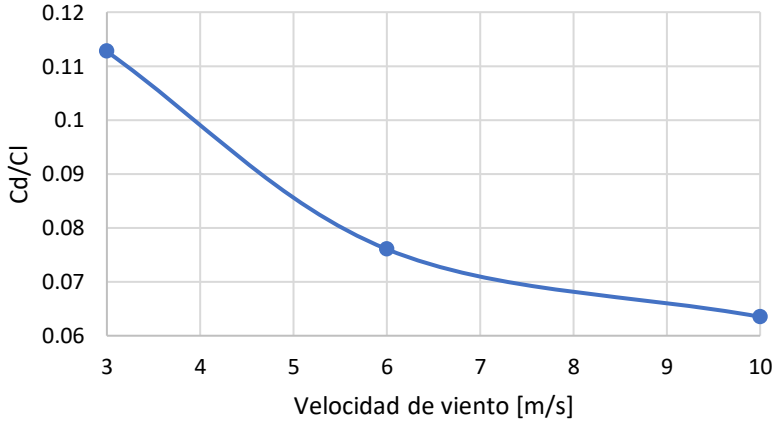
Calidad aerodinámica [Cd/Cl] vs ángulo de ataque



En cuanto a la calidad aerodinámica de la variación de velocidades a un ángulo óptimo de 4° se concluyó que el perfil tiene un mejor rendimiento aerodinámico frente a una velocidad de 10 m/s con una calidad de 0.063 como se muestra en la figura 53.

Figura 53

Calidad aerodinámica [Cd/Cl] vs velocidad de viento



4.4 Análisis experimental en el túnel de viento

4.4.1 Ensayo de laboratorio

Aunque en la simulación desarrollada en Ansys Fluent se analizaron velocidades de 3, 6 y 10 m/s, durante la fase experimental no fue posible llegar a estos valores debido a limitaciones operativas y constructivas del túnel de viento automatizado como: pérdidas por fricción interna, turbulencias no previstas, fugas de flujo y pérdidas aerodinámicas en la sección de contracción y en la cámara de pruebas. Además de que las simulaciones se desarrollaron bajo condiciones ideales y controladas, y por otro lado el prototipo opera en condiciones reales donde intervienen variables mecánicas y aerodinámicas que afectan el desempeño final del sistema. En consecuencia, la velocidad en la experimentación fue menor a la estimada y se seleccionaron valores de 3, 4 y 5 m/s dado que en este rango las condiciones son más estables y seguras para su repetición en el funcionamiento del túnel, lo que permitió obtener datos consistentes y garantizar una adecuada adquisición de datos para el análisis del perfil NACA 6412.

De igual manera, la selección de velocidades consecutivas permitió analizar el comportamiento progresivo de las variables aerodinámicas frente al incremento de la velocidad de flujo, facilitando la identificación de tendencias en los coeficientes de sustentación, arrastre y calidad aerodinámica. Este rango de velocidades está dentro de valores comúnmente utilizados en túneles de viento de baja velocidad orientados a aplicaciones académicas y experimentales, donde el objetivo principal es analizar las tendencias aerodinámicas y así validar el comportamiento del flujo, más que reproducir condiciones operativas a gran escala, permitiendo evaluar el comportamiento del perfil NACA 6412 bajo condiciones controladas de operación.

4.4.2 Sistema de adquisición de datos

Este sistema se basó en el uso de un anemómetro digital UT363BT con conectividad Bluetooth, el cual permitió visualizar y registrar las mediciones de velocidad de viento en tiempo real a través de la aplicación iENV. Una vez recopilados los datos, se exportaron en un archivo .xls (Excel) desde iENV y se incorporaron al código desarrollado para procesarlos y generar gráficas a partir de los coeficientes aerodinámicos resultantes.

4.4.3 Programación y automatización del sistema

4.4.3.1 Código

El código desarrollado en Python cuenta con una interfaz gráfica diseñada específicamente para el cálculo y análisis de coeficientes aerodinámicos de perfiles alares, esta herramienta permite determinar el coeficiente de sustentación (Cl), coeficiente de arrastre (Cd) y el número de Reynolds (Re) a partir de datos experimentales tanto del túnel de viento como la simulación en Ansys Fluent. Dentro de este se definieron parámetros que van a permanecer constantes en su ejecución representando las condiciones de operación del túnel de viento y la geometría del modelo a analizar, estos son: la densidad del aire 0.9358 kg/m^3 presente en el laboratorio, área de referencia de la superficie del perfil que es 0.01 m^2, viscosidad dinámica de 1.7197 x 10^{-5} kg/m*s y la cuerda de perfil de 0.1 m que es esencial para el cálculo del número de Reynolds; estos pueden modificarse dentro del código para adaptarse a diferentes condiciones experimentales. El núcleo computacional del código está en las ecuaciones fundamentales de la aerodinámica (presión dinámica, coeficiente de arrastre, coeficiente de sustentación, número de Reynolds y calidad aerodinámica Cl/Cd y Cd/Cl) las cuales se resuelven automáticamente cada vez que se soliciten nuevos cálculos.

4.4.3.2 Interfaz

La interfaz cuenta con dos modos de operación que se pueden seleccionar fácilmente: el modo individual donde se analiza el comportamiento del perfil para diferentes ángulos de

ataque (Figura 54) y un modo óptimo (figura 55) que evalúa el ángulo de ataque óptimo frente a diferentes velocidades de viento, donde se puede modificar el valor del ángulo de ataque y velocidad. Este software es una herramienta indispensable para la automatización del análisis experimental dado que elimina la necesidad de cálculos manuales y reduce en gran medida el tiempo de procesamiento de datos.

Figura 54

Interfaz modo individual

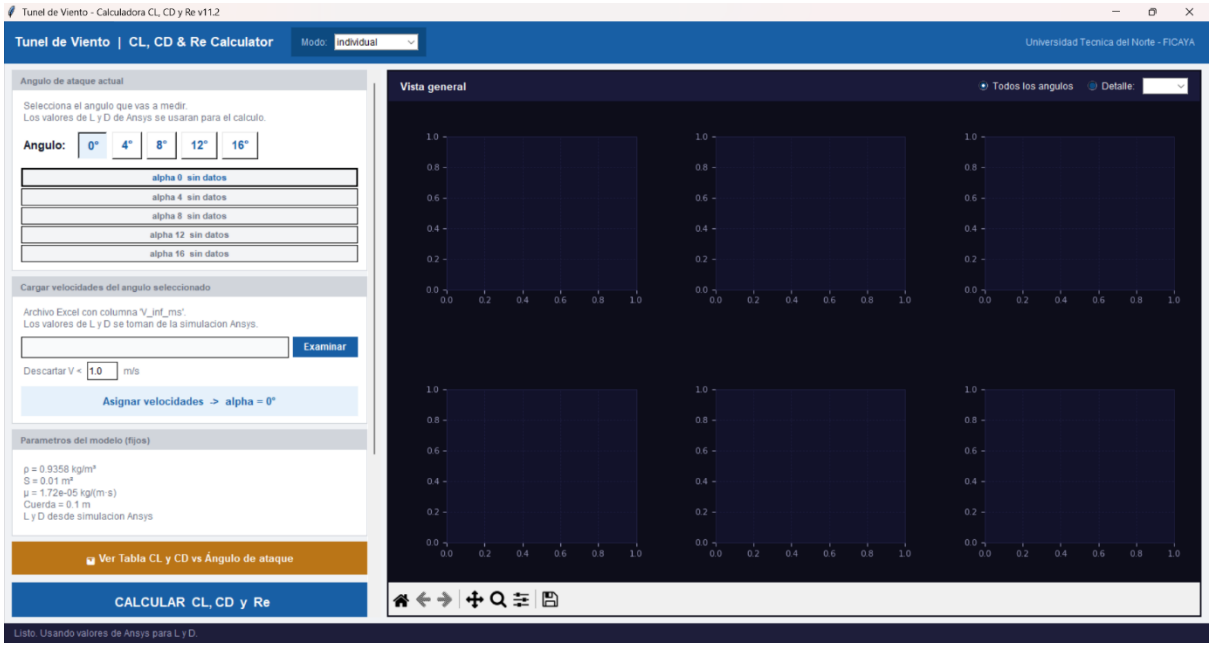
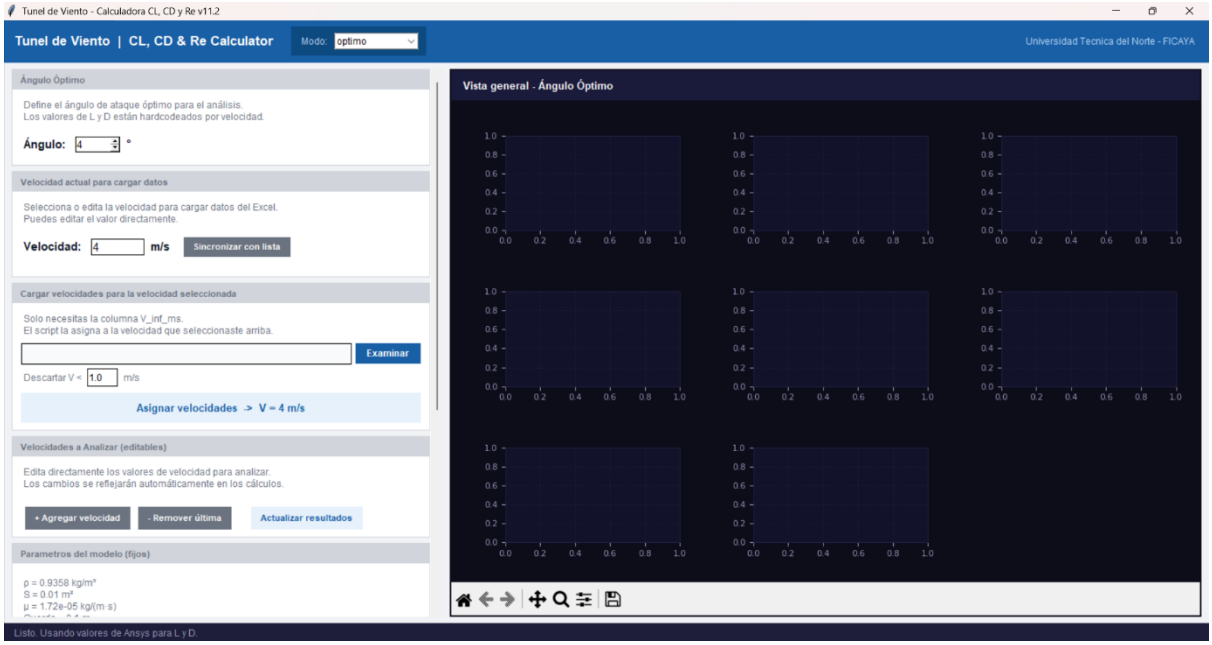


Figura 55

Interfaz modo óptimo



Como se ve en la figura 54 la interfaz en este modo cuenta con una barra de título en la parte superior donde se selecciona el modo a utilizar; en la parte izquierda están los controles de entrada donde se puede seleccionar el ángulo de ataque para cargar los respectivos archivos de Excel con datos del anemómetro para cada ángulo mediante el botón “Examinar” y luego hacer clic en “Asignar velocidades”. Para subir los datos recopilados por el anemómetro a la interfaz se aceptan archivos en formato xlsx., xls. y csv. el cual debe tener una columna denominada V_inf_ms donde estarán todos los datos de velocidad en m/s para que el código pueda leer y así procesar los demás resultados, además se puede modificar a gusto un límite de valores de velocidad inferiores a un cierto valor como por ejemplo hacer que se descarten valores inferiores a 1 m/s y se calculan automáticamente estadísticas descriptivas como el promedio aritmético, desviación estándar, valores mínimos y máximos así como el número total de lecturas validas. Luego el código calcula la velocidad promedio de todas las lecturas validas y busca los respectivos valores de las fuerzas aerodinámicas para el ángulo seleccionado y así obtener los valores de sustentación y arrastre; con estos datos se ejecutan las fórmulas mencionadas y los resultados son presentados en una tabla (Anexo 3 tabla 1) y en 6 gráficas que incluyen: Cl vs Ángulo de ataque, Cd vs Ángulo de ataque, polar aerodinámica, eficiencia L/D, calidad aerodinámica y Reynolds vs Ángulo de ataque.

Por otro lado, la interfaz del modo óptimo está diseñada para analizar el ángulo de ataque óptimo frente a diferentes velocidades, los cuales son de libre elección ya que se puede elegir un ángulo óptimo entre 0° y 20° y a su vez elegir a que velocidades se puede analizar ya que son campos editables con el botón “Agregar velocidad” y para eliminar un valor de velocidad con el botón “Remover última”. Para cada velocidad definida el código obtiene los valores de sustentación y arrastre mediante una interpolación lineal a partir de los datos recopilados de Ansys Fluent cuando la velocidad no coincide con los valores disponibles, lo cual es útil cuando se requiere analizar velocidades intermedias no incluidas originalmente en

la simulación permitiendo una evaluación más continua y detallada del comportamiento aerodinámico del perfil sin necesidad de simulaciones adicionales. Finalmente calcula los coeficientes aerodinámicos correspondientes en una tabla (Anexo 3 tabla 2) y genera ocho gráficas que indican la evolución de Cl, Cd, L/D, Cd/Cl y Re en función de la velocidad, todas actualizadas en tiempo real al modificar cualquier parámetro.

Una vez completado el análisis el sistema automatiza la generación de informes y la exportación de datos mediante un proceso estructurado en el modo individual, al hacer clic em "Exportar resultados" el programa crea instantáneamente un archivo Excel o CSV según lo seleccionado. El archivo genera una hoja principal denominada Resultados_Optimo que incluye todas las variables calculadas y una hoja adicional llamada Lecturas_Detalle que contiene el detalle de todas las lecturas individuales de velocidad procesadas desde el archivo Excel original. En el modo óptimo, la exportación incluye una distinción importante entre la velocidad teórica V_teorica_ms y la velocidad promedio real obtenida de las mediciones V_promedio_real_ms permitiendo evaluar la precisión de los puntos de operación seleccionados y documental cualquier desviación entre los valores deseados y los realmente alcanzados en el túnel de viento.

4.4.4 Procedimiento experimental y evaluación de parámetros aerodinámicos

Para elegir la mejor velocidad para los análisis se analizó el perfil con un ángulo de ataque de 0° a 3, 4.07 y 4.89 m/s; velocidades elegidas luego de 3 repeticiones iniciales en el túnel de viento. En base a la tabla 17 se definió que la mejor velocidad es de 4.89 m/s, aunque la sustentación disminuye al aumentar la velocidad pasando de 4.17 a 1.57 la calidad se mantiene constante en 0.0875 dando a entender que el perfil conserva la misma eficiencia. Sin embargo, a 4.89 m/s el coeficiente de arrastre es significativamente menor en comparación con los valores obtenidos a 3 m/s y 4.07 m/s, esto implica que, para tener la misma calidad, el perfil experimenta menos resistencia a una velocidad más alta, haciendo un menor esfuerzo

estructural, menor disipación de energía y un funcionamiento más eficiente desde el punto de vista energético.

Tabla 17

Selección de velocidad

Velocidad [m/s]	Cd	Cl	ε
3	0.365629171	4.178283299	0.087507032
4.07	0.198652726	2.270134422	0.087507032
4.89	0.137553062	1.571908665	0.087507032

Una vez elegida la velocidad optima de análisis se analizó el comportamiento del perfil NACA 6412 con la misma variación del ángulo de ataque que en la simulación CFD frente a una velocidad de 4.89 m/s presentado en la tabla 18.

Tabla 18

Coeficientes aerodinámicos en función del ángulo de ataque

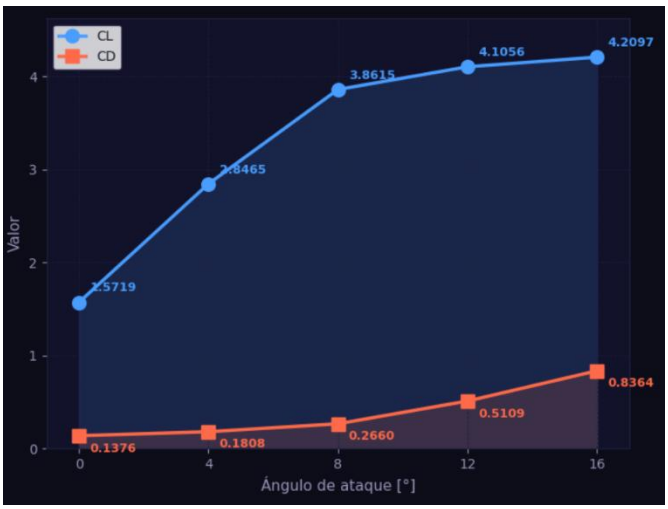
Ángulo de ataque [°]	Cd	Cl	ε
0	0.137553062	1.571908665	0.087507032
4	0.180778	2.8465	0.063508913
8	0.265957	3.86152	0.068873652
12	0.510889	4.105635	0.124436038
16	0.836366	4.209706	0.198675646

De acuerdo a la definición de la calidad aerodinámica (Cd/Cl) el ángulo óptimo para este análisis es de 4° como en la simulación, además de que de acuerdo a la figura 56 desde los 8° en adelante se presenta un crecimiento exponencial de arrastre y una estabilización de la sustentación conforme el ángulo de ataque aumenta de 8 a 16°, es decir que, mientras más

aumente el ángulo de ataque del perfil NACA 6412 se vuelve menos eficientes, comprobando entonces que el ángulo de ataque de 4° es el óptimo para este análisis.

Figura 56

Cl y Cd vs Ángulo de ataque



Finalmente, luego de identificar el ángulo de ataque óptimo, se analizó el comportamiento del mismo bajo diferentes velocidades de viento: 3, 4.07 y 4.89 m/s con el objetivo de caracterizar la respuesta del perfil frente a estos cambios y verificar su rendimiento en un rango de velocidades como se ve en la tabla 19.

Tabla 19

Coeficientes aerodinámicos en función de la velocidad del aire para α = 4°

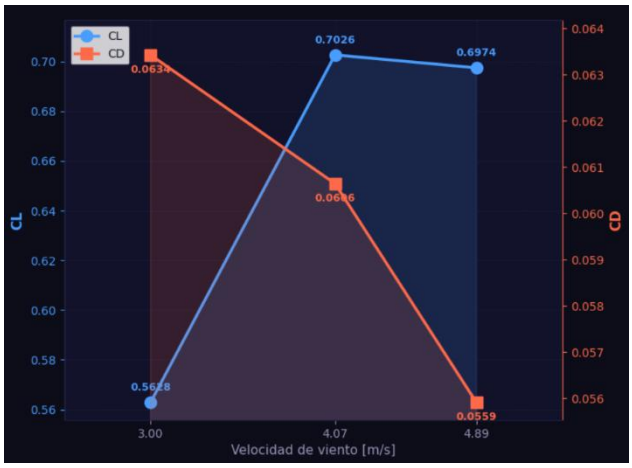
Velocidad [m/s]	Cd	Cl	ε
3	0.063426	0.562802	0.112698
4.07	0.060645	0.702638	0.08631
4.89	0.055912	0.697433	0.080168

Estos datos se muestran en la figura 57, donde el coeficiente de sustentación incrementa progresivamente con la velocidad, pasando de 0.5628 a 0.6974 entre 3 y 4.89 m/s, mientras que el coeficiente arrastre disminuye de 0.0634 a 0.0559 en el mismo rango de velocidades.

Por lo que su rendimiento es mejor a una velocidad de 4.89 m/s con una calidad de 0.0801, siendo este un comportamiento conveniente para aplicaciones en aerogeneradores, ya que una mejor calidad aerodinámica es una condición clave para aumentar la extracción de energía eólica.

Figura 57

Cl y Cd vs Velocidad de viento



4.4.5 Procesamiento y análisis de resultados

4.4.5.1 Resultados experimentales con variación del ángulo de ataque

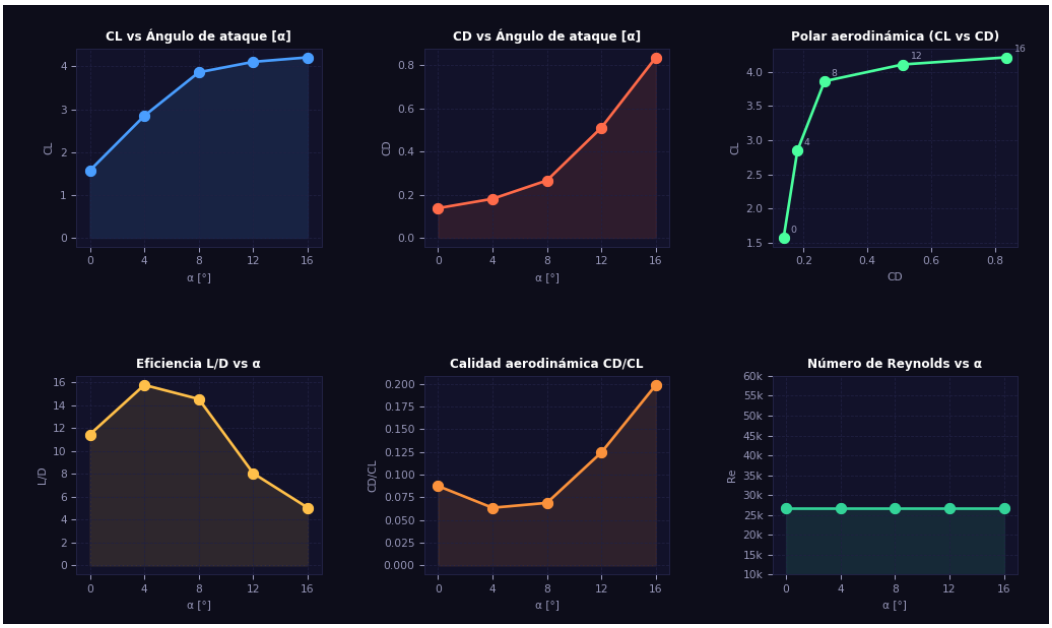
La figura 58 presenta el comportamiento de parámetros aerodinámicos del perfil NACA 6412 en función del ángulo de ataque. El coeficiente de sustentación aumenta progresivamente de 0° a 16° evidenciando una mayor capacidad de generación de sustentación conforme incrementa α, sin embargo, después de 8° el crecimiento tiende a estabilizarse indicando una posible aproximación a la perdida aerodinámica. Por otra parte, el coeficiente de arrastre también incrementa con el ángulo de ataque, pero de manera más abrupta a partir de los 8° debido al aumento de la separación del flujo y pérdidas aerodinámicas.

La polar aerodinámica muestra que el perfil presenta un rango de operación eficiente entre 0° y 8° donde pequeños incrementos de resistencia generan aumentos significativos de sustentación; esto se confirma con la gráfica de eficiencia aerodinámica cuyo valor máximo se obtiene a 4° y luego tiende a decaer por el incremento de arrastre, representando la condición

optima de operación del perfil. Asimismo, en la relación Cd/Cl se ve que las menores pérdidas aerodinámicas están a un ángulo de 4° y en cuanto al número de Reynolds, este permanece prácticamente constante durante las pruebas indicando que las variaciones observadas en los coeficientes aerodinámicos son debido al cambio del ángulo de ataque y no a alteraciones en las condiciones del flujo.

Figura 58

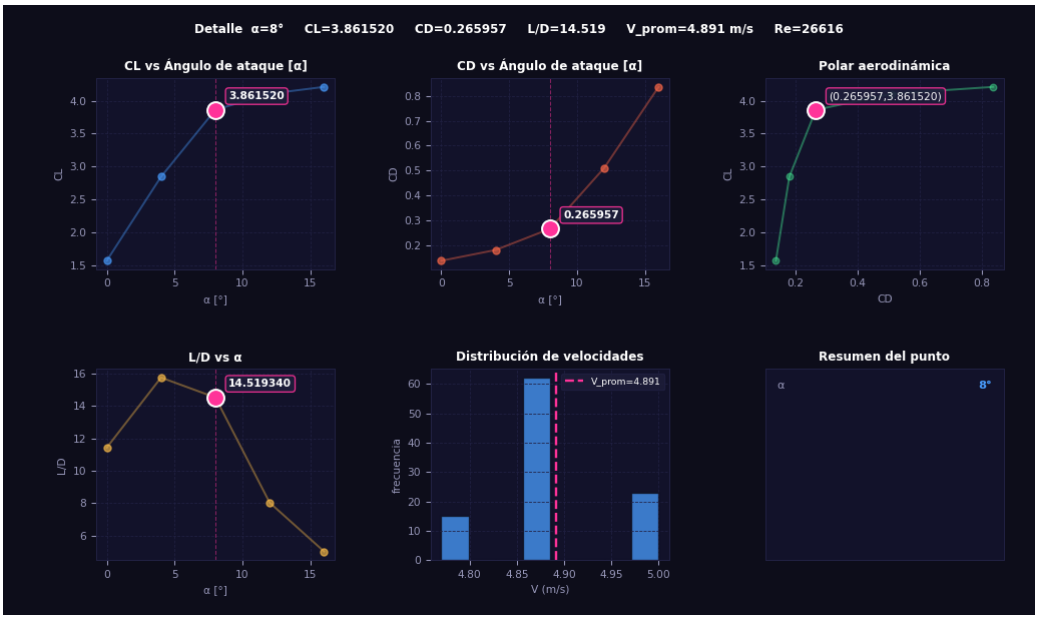
Caracterización aerodinámica experimental del perfil en función del ángulo de ataque



Por otro lado, también hay la opción de seleccionar el análisis de un solo ángulo como se ve en la figura 59 para mayor detalle.

Figura 59

Caracterización aerodinámica experimental detallada en función del ángulo de ataque



4.4.5.2 Resultados experimentales con variación de velocidad a un ángulo de ataque óptimo

La figura 60 muestra el comportamiento de los parámetros aerodinámicos del perfil NACA 6412 en función de la velocidad de viento. Se observa que el coeficiente de sustentación aumenta ligeramente conforme incrementa la velocidad llegando a valores de 0.7, lo que indica una mejora moderada en la capacidad de generación de sustentación del perfil. En cambio, el coeficiente de arrastre presenta una leve disminución con el aumento de la velocidad, evidenciando una reducción de pérdidas aerodinámicas. La polar aerodinámica refleja un comportamiento favorable del perfil, ya que el incremento de sustentación ocurre sin aumentos considerables de arrastre; esto se confirma en la gráfica de eficiencia aerodinámica donde se ve un incremento progresivo de la relación L/D a mayores velocidades indicando una operación más eficiente del perfil y de igual manera, la relación Cd/Cl disminuye conforme aumenta la velocidad representando una mejora en la calidad aerodinámica.

Finalmente, el número de Reynolds aumenta proporcionalmente con la velocidad de viento pasando de 16324.94 a 26609.65 dado su relación directa, comprobando que el perfil opera bajo condiciones de flujo de bajo Reynolds, que de acuerdo con Almeida & Rezende (2024) es una condición característica de aplicaciones aerodinámicas a pequeña escala y ensayos en túneles de viento de dimensiones reducidas.

Figura 60

Caracterización aerodinámica experimental del perfil en función de la velocidad a un ángulo de ataque óptimo



CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se diseñó un túnel de viento subsónico de circuito abierto mediante criterios de diseño aerodinámico, modelado CAD y simulación CFD, definiendo las dimensiones y características geométricas de las secciones de contracción, cámara de pruebas y difusor. El diseño obtenido permitió desarrollar un prototipo funcional con fines académicos y experimentales para el Laboratorio de Energías Renovables, proporcionando condiciones adecuadas para el análisis de perfiles aerodinámicos a pequeña escala.
- El análisis CFD del perfil NACA 6412 permitió validar el modelo numérico mediante la comparación de los resultados obtenidos con los reportados por Berger et al. (2024), observándose una concordancia completa en el coeficiente de arrastre y una tendencia consistente en los parámetros aerodinámicos evaluados. Asimismo, el estudio permitió caracterizar el comportamiento del perfil bajo diferentes condiciones de operación, determinándose que el ángulo de ataque de 4° presenta el mejor desempeño aerodinámico. Se evidenció además que, a medida que el ángulo de ataque aumenta por encima de este valor, el arrastre se incrementa debido a la separación progresiva del flujo. Entre las velocidades analizadas, 10 m/s presentó las condiciones más favorables para la evaluación aerodinámica del perfil.

  La distribución de velocidades y presiones obtenida mediante CFD permitió identificar los mecanismos aerodinámicos responsables de la generación de sustentación en el perfil NACA 6412. A un ángulo de ataque de 4°, se observó una aceleración del flujo sobre el extradós y una diferencia de presión favorable

entre ambas superficies del perfil, produciendo una mayor sustentación con una penalización reducida por arrastre. Esta condición permitió alcanzar un Cd de 0.043, un Cl de 0.680 y una calidad aerodinámica de 0.063 confirmando que, dicha condición representa el punto de operación más eficiente dentro del rango analizado.

- Se construyó e implementó un prototipo de túnel de viento automatizado equipado con un sistema de regulación de velocidad, un anemómetro digital con conectividad Bluetooth y una interfaz desarrollada en Python para la adquisición, procesamiento y visualización automática de datos experimentales. Esta integración permitió disponer de una plataforma didáctica capaz de automatizar el registro y análisis de variables aerodinámicas relevantes.
- Los ensayos experimentales evidenciaron que las pérdidas asociadas a fricción, turbulencia y fugas de flujo limitaron las velocidades alcanzables respecto a las condiciones simuladas. No obstante, los resultados mostraron tendencias coherentes con el análisis numérico, identificándose nuevamente un mejor desempeño aerodinámico para un ángulo de ataque de 4°. Además, se observó que el incremento de la velocidad favorece el comportamiento aerodinámico del perfil dentro del rango evaluado, alcanzándose las mejores condiciones experimentales a 4.89 m/s.
- El trabajo de titulación permitió desarrollar una herramienta experimental para la evaluación aerodinámica de perfiles utilizados en aplicaciones eólicas, fortaleciendo las capacidades del Laboratorio de Energías Renovables y proporcionando una base tecnológica para futuros estudios relacionados con energía eólica, aerodinámica y mecánica de fluidos.

5.2 Recomendaciones

- Se sugiere que la carrera implemente mejoras progresivas en los equipos del túnel de viento, especialmente en sistemas de medición, visualización de flujo e instrumentación, con el fin de optimizar la precisión de las evaluaciones aerodinámicas y fortalecer las prácticas experimentales de los estudiantes y fortalecer el uso y actualización de software de simulación CFD dentro de la carrera, incorporando herramientas y licencias que permitan análisis aerodinámicos más detallados, así como promover el uso del túnel de viento diseñado como plataforma práctica para la evaluación de distintos perfiles aerodinámicos en futuros trabajos académicos.
- En base a los resultados del análisis CFD, en específico de los porcentajes de error obtenidos en el coeficiente de sustentación y calidad aerodinámica durante la validación, se recomienda que para futuras simulaciones se incorpore el Ansys Fluent Pro ya que aquí se puede cambiar un mallado triangular por uno cuadrilátero estructurado y así mejorar la precisión de los resultados. Adicionalmente, se sugiere probar modelos de turbulencia alternativos como el SST k-ω o el modelo de transición SST, los cuales suelen ser más exactos para ángulos de ataque superiores a 8°; y realizar simulaciones tridimensionales que consideren parámetros más realistas como el efecto en la punta de la pala para que se acerque más a la realidad.
- Con el fin de ampliar el rango operativo del túnel de viento, se recomienda optimizar el sistema de ventilación mediante la incorporación de un ventilador de mayor capacidad o de un sistema de impulsión que permita alcanzar velocidades más cercanas a las consideradas en la simulación CFD. Esto posibilitará la realización de ensayos aerodinámicos en un rango más amplio de

velocidades y una comparación más directa entre los resultados numéricos y experimentales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbott, I. H., & Von, A. E. (1949). *Theory of Wing Sections: Including a Summary of Airfoil Data*. https://aeroknowledge77.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/09/58986488-theory-of-wing-sections-including-a-summary-of-airfoil-data.pdf

Adaramola, M. (2014). *Wind Turbine Technology Principles and Design*.

Alave, E., Orellana, R., & Sempértegui, D. (2022). ESTADO DEL ARTE SOBRE AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL. *INVESTIGACION & DESARROLLO*, *22*(1). https://doi.org/10.23881/idupbo.022.1-13i

Almeida, O., & Rezende, R. (2024). Experimental Aerodynamics of a NACA 4424 Airfoil at Low Reynolds Number Flow. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, *45*, e51520. https://doi.org/10.5433/1679-0375.2024.v45.51520

Anderson, J. (2017). *Fundamentals of Aerodynamics* (6th ed.). McGraw-Hill Education.

Anderson, J. D. (2016). *Introduction to Flight* (8th ed.). McGraw-Hill Education. https://aerospace.gdgoenka-university.com/wp-content/uploads/2023/10/introduction-to-flight-8th-edition-pdf-free.pdf

Ansys Fluent. (2025). *Ansys Fluent User's Guide*. https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/prod_page.html?pn=Fluent

Arsuaga, D. (2023). *Estudio de las fuerzas de sustentación y arrastre en un perfil NACA en un túnel de viento subsónico no-normalizado.* [Universidad Iberoamericana Puebla]. https://hdl.handle.net/20.500.11777/5912

Arumugam, P., Ramalingam, V., & Bhaganagar, K. (2021). A pathway towards sustainable development of small capacity horizontal axis wind turbines – Identification of influencing design parameters & their role on performance analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *44*. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101019

Balduzzi, N. (2022). *Diseño y construcción de un túnel de viento supersónico con sistema de visualización Schlieren* [Universidad Nacional de La Plata]. https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/137588

Barlow, J. B. ., Rae, W. H. ., & Pope, Alan. (1999). *Low-speed wind tunnel testing*. Wiley. https://www.academia.edu/35129053/LOW_SPEED_WIND_TUNNEL_TESTING_THIRD_EDITION_A_WILEY_MTERSCIENCE_PUBLICATION

Bayona, E., Sierra, J. E., & Santos, M. (2025). Metaheuristic Techniques for the Control of Offshore Wind Turbines: State of the Art and Perspectives. *Simposios Del Comité Español de Automática (CEA)*, *1*(Spain), 2025. https://ingmec.ual.es/ojs/index.php/RBVM25/article/view/86

Benavides, M. (2025). *Análisis y evaluación de la eficiencia de doce tipos de perfiles aerodinámicos NACA en un túnel de viento bajo condiciones de viento variable y estable en la EPIER-SEDE AYABACAS* [Universidad Nacional de Juliaca]. 4. https://repositorio.unaj.edu.pe/items/0a42bc23-4f84-4c64-a5fc-682ad23863fd

Bergadà, J. M. . (2012). *Mecánica de fluidos breve introducción teórica con problemas resueltos*. Iniciativa Digital Politècnica. https://upcommons.upc.edu/entities/publication/29d38c57-dac8-4746-8e66-e135755fefa8

Berger, M., Raffeiner, P., Senfter, T., & Pillei, M. (2024). A comparison between 2D DeepCFD, 2D CFD simulations and 2D/2C PIV measurements of NACA 0012 and NACA 6412 airfoils. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, *57*. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2024.101794

Bertin, J. J., & Cummings, R. M. (2009). *Aerodynamics for Engineers* (5th ed.). Pearson Education International. https://www.airloads.net/Downloads/Textbooks/Aerodynamics-for-engineers-%20John%20J.Bertin.pdf

Bianchi, F. (2024). *Estudio experimental de un perfil aerodinámico NACA0012* [Universitat Politècnica de Catalunya]. https://upcommons.upc.edu/entities/publication/b8297b84-2f36-48a5-95ab-15056182c84a

Bolat, F. C., Basaran, S., & Sivrioglu, S. (2019). Piezoelectric and electromagnetic hybrid energy harvesting with low-frequency vibrations of an aerodynamic profile under the air effect. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *133*. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106246

Burgos, M., Aldana, S., & Rodríguez, D. (2015). Análisis del recurso energético eólico para la ciudad de Bogotá DC para los meses de diciembre y enero, Colombia. *AVANCES Investigación En Ingeniería*, *12*, 1794–4953. https://doi.org/https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.278

Bustillos, B., & Zambrano, J. (2018). *Diseño y Simulación de un Banco de Pruebas Aerodinámico (Túnel de Viento) para la Validación de Simulaciones con Software CFD*. https://repositorio.uteq.edu.ec/items/5eaee038-fff4-449c-8e09-ecea693be870

Cáceres, C. (2021). *Diseño de un perfil aerodinámico para bajos números de Reynolds mediante herramientas computacionales* [Universidad de Pamplona]. http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/4149

Canizales, M., & Tercero, J. (2020). *Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal* [Universidad Nacional de Ingeniería]. https://ribuni.uni.edu.ni/4091/

Casa, E. (2023). *Diseño y Construcción de un Túnel de Viento a Escala Para Obtener Datos Mediante Pruebas Aerodinámicas* [Universidad Internacional SEK]. https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/5040

Cascante, O. (2019). *Diseño de un Túnel de Viento de circuito abierto en régimen subsónico de tipo succión para pruebas aerodinámicas en enfoque multipropósito de la Escuela de Ingeniería Electromecánica para la futura carrera de Ingeniería Electromecánica con énfasis en Mantenimiento aeronáutico* [Tecnológico de Costa Rica]. https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/15073

Castaño, A. (2023a). *Análisis del recurso eólico para la generación eléctrica en distintas regiones de México* [Universidad Nacional Autónoma de México]. https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/443a7413-a368-41d3-91e7-415fc4d5aaaa/content

Castaño, A. (2023b). *Análisis del recurso eólico para la generación eléctrica en distintas regiones de México*.

Castellanos, A. (2020). *Análisis de la geometría del difusor en el desempeño aerodinámico de un cuerpo Ahmed* [Universidad de los Andes]. https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/b9b236c0-4d28-4177-a31b-813e4b5d5d63

Castro, N. (2018). *MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL RECURSO EÓLICO PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA BASADO EN FLUJOS TURBULENTOS* [Universidad Politécnica Salesiana]. https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15788

Cengel, Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica* (7th ed.). https://www.academia.edu/39821820/Termodin%C3%A1mica_Cengel_and_Boles_7ma_edici%C3%B3n

Centeno, M. (2021). *Diseño de un túnel de viento anecoico para el Campus Sur de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM)* [Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/70465/

Chen, J., Wang, Q., Zhang, S., Eecen, P., & Grasso, F. (2016). A new direct design method of wind turbine airfoils and wind tunnel experiment. *Applied Mathematical Modelling*, *40*(3), 2002–2014. https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.09.051

Cubillos, A. (2019). *Fabricación de montaje de pruebas y análisis aerodinámico de perfiles de borde recortado a condiciones de bajo Reynolds* [Universidad de Los Andes]. https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/8dec83f8-e6a5-4ccb-b2fb-d475e2dfa07a/content

D'Alessandro, V., Montelpare, S., Ricci, R., & Zoppi, A. (2017). Numerical modeling of the flow over wind turbine airfoils by means of Spalart–Allmaras local correlation based transition model. *Energy, 130*, 402–419. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.134

Dassault Systèmes. (2020). *Introducción a SolidWorks*. https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS_Introduction_ES.pdf

Dávalos, E. (2020). *Modelo Numérico CFD del Túnel de Carga, Tubería a Presión y Distribuidores utilizando el Paquete Computacional Ansys Fluent. Caso de Aplicación Proyecto Hidroeléctrico Sopladora* [Escuela Politécnica Nacional]. https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20657?mode=full

De La Calle, A. (2021). *Disseny d'un túnel de vent de baixa velocitat per a medicions aerodinàmiques*. https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/174019/Calle%20-%20Diseno%20de%20un%20tunel%20de%20viento%20de%20baja%20velocidad%20para%20mediciones%20aerodinamicas.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Desnous, T. (2022). *ADAPTACIÓN TECNOLÓGICA DEL DOBLADO DE MADERAS PARA FABRICAR ASPAS DE AEROGENERADORES* [Universidad EIA]. https://repository.eia.edu.co/entities/publication/387c3da0-d682-4c00-b622-ecb379f1eb25

Diago, C. (2019). *Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico* [Universitat Politècnica de València]. https://riunet.upv.es/entities/publication/f618836d-78f5-452c-be18-442aff329273

Elgack, M. E., Al-Souqi, K., Hamdan, M. O., & Abdelgawad, M. (2024). Compressibility effects in microchannel flows between two-parallel plates at low reynolds and mach numbers: Numerical analysis. *International Journal of Thermofluids*, *24*. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100921

Fang, H., Feng, Y., Wei, X., & Xiong, J. (2023). Wind turbine blade damage aerodynamic profile analysis and its repair techniques. *Energy Reports*, *9*, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.041

Fernández, A. (2021). *Optimización del diseño de perfiles aerodinámicos mediante algoritmo genético* [Universidad de Sevilla]. https://idus.us.es/server/api/core/bitstreams/1697b303-2f21-46e9-89d0-d29b3ccccb75/content

Fernández, F., Jara, C., Hernández, E., Pepper, M., & Navarro, G. (2024). Diseño y construcción de un túnel de viento subsónico de circuito abierto. *Tecnología En Marcha*, *38*, 128–144. https://doi.org/https://doi.org/10.18845/tm.v38i1.7051

Figueroa, D. (2022). *Experimentación Aerodinámica en Túnel de Viento de Modelo Físico a Escala de Vehículo tipo HATCHBACK* [Universidad de los Andes]. https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/e0235220-7e4a-40ca-9fd2-5a0a47f54a8e

Figueroa, J., & Cruz de Jesús, A. (2024a). Diseño y análisis de túnel de viento subsónico para laboratorio de aerodinámica. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del ICBI*, *12*, 221–225. https://doi.org/10.29057/icbi.v12iespecial4.13342

Figueroa, J., & Cruz de Jesús, A. (2024b). Diseño y análisis de túnel de viento subsónico para laboratorio de aerodinámica. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del ICBI*, *12*, 221–225. https://doi.org/https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial4.13342

Ganiele, M., Nicoletti, P., Villanueva, A., Montenegro, S., Lingeri, S., Anello, D., & Melo, M. (2021). Diseño y Simulación de Perfiles de Aerogeneradores Horizontales a Bajo Número de Reynolds. *INNOVA UNTREF*. *Revista Argentina de Ciencia y Tecnología*, *7*. https://revistas.untref.edu.ar/index.php/innova/article/view/1106

García, A. (2023). *ANÁLISIS DEL RECURSO EÓLICO EN LA PENÍNSULA IBÉRICA A PARTIR DE PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE VIENTO* [Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/76196/

García, J. C. (2023). *Investigación experimental de la interferencia aerodinámica fragata-helicóptero y mitigación de sus efectos adversos mediante control de flujo* [Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/74524/

Ghorbanpoor, A., Karimian, S. M. H., & Moradi, M. (2024). Aerodynamic performance improvement of 3-PB VAWT using blades with optimized tilted angles. *Cleaner Engineering and Technology*, *22*. https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100801

Gonzales, D., & Gonzales, N. (2025). *Evaluación del Perfil Aerodinámico Aspa de una Turbina Eólica Centrado en el Aerogenerador Marca IMPSA IWP-83-2100 en el Parque Guajira I Colombia* [Universidad de América]. https://repository.uamerica.edu.co/items/d43d7c03-981f-4c36-accf-0e8a7e8bebb4

González, G., De la Cruz, E., Inclán, J., Pacheco, C., & Ponce, J. (2025). Evaluación de la Velocidad del Viento a Diferentes Alturas: Estudio Temporal y Espacial en Boca del Río, Veracruz. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *9*(1), 6245–6255. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1.16334

González, J. (2021). *Diseño y construcción de un túnel de viento con cámara de pruebas modular* [Universidad Nacional de Colombia]. https://repositorio.unal.edu.co/items/a3ae2383-f7fe-4d23-81d7-e353c9be23fa

Guachamín, H. (2024). *Diseño de un túnel de viento a escala para estudiar la aerodinámica en perfiles NACA 63A418 y NACA 64A010* [Escuela Politécnica Nacional]. https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/25831

Hernández, R., Méndez, S., Ramos, F., & Muñoz, R. (2021). *Propuesta de Diseño para el Análisis de Diferentes Perfiles NACA Aplicado a Turbinas Eólicas Horizontales*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13055.94883

Hitchens, F. E. (2015). *The Encyclopedia of Aerodynamics*. AUK Academic. https://es.everand.com/book/352274298/The-Encyclopedia-of-Aerodynamics

Houghton, E. L., & Carpenter, P. W. (2003). *Aerodynamics for Engineering Students* (5th ed.). https://soaneemrana.org/onewebmedia/Aerodynamics---Houghton&Carpenter.pdf

Hu, W., Wang, S., Zhang, T., Zhang, Y., Shi, W., Li, Q., & Zhang, F. (2025). Uncertainty quantification of aerodynamic characteristics of wind turbine blade airfoils. *Renewable Energy*, *248*. https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123151

Hurt, H. H. (1965). *Aerodynamics for Naval Aviators*. https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/00-80T-80.pdf

Ibrahim, S. S., Zafar, M., Daabo, A. M., Yaseen, A., & Al-Amir, Q. (2025). Three dimensional analysis and aerodynamic modelling of different wind turbine blade profiles accounting materials' Roughness impact. *Results in Engineering*, *27*. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106704

Javaid, M. T., & Hassan, S. S. ul. (2024). Power performance optimization of twin vertical axis wind turbine for farm applications. *Wind Energy and Engineering Research*, *2*, 100005. https://doi.org/10.1016/j.weer.2024.100005

Jordán, J. (2019). *ESTUDIO Y DISEÑO DE UN TUNEL DE VIENTO PARA APLICACIONES DIDÁCTICAS*. https://repositori.tecnocampus.cat/handle/20.500.12367/144

López, Á. (2025). *Diseño de un túnel de viento subsónico con sistema de control personalizado y arquitectura modular* [Universitat Politècnica de Catalunya]. https://upcommons.upc.edu/entities/publication/9c24012a-6a6e-48e1-916e-96f3a6c0a564

López, J., & Sánchez, S. (2019). *DISEÑO BÁSICO DE UN TÚNEL DE VIENTO PARA EXPERIMENTACIÓN CON UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL TIPO DARRIEUS* [Fundación Universidad de América]. https://repository.uamerica.edu.co/items/26d6a09a-6c64-4fb4-a74a-eef5e1556de0

López, O. (2021). *Estudio Aerodinámico de un perfil NACA* [Universitat Politècnica de Catalunya]. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/357232/TFG_ORIOL_LOPEZ_MEMORIA_QP2021.pdf?sequence=1

Ludeña, A. (2019). *Diseño e implementación de un túnel de viento de circuito abierto para una mejor exactitud en la calibración de anemómetros* [Universidad Tecnológica del Perú]. https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/2377

Majid, T., & Jo, B. (2021). Comparative aerodynamic performance analysis of camber morphing and conventional airfoils. *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(22). https://doi.org/10.3390/app112210663

Maldonado, P., & Calle, R. (2023). *Desarrollo de un túnel aerodinámico para estudios con fines pedagógicos en la UPS Sede Guayaquil* [Universidad Politécnica Salesiana]. https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26072

Mancilla, J., Zaragoza, A., Iturbe, A., Jiménez, J., & Traslosheros, A. (2020). *Diseño de una tobera convergente-divergente para un túnel de viento supersónico de número de mach de 1.6*. https://somim.org.mx/memorias/memorias2020/articulos/A4_54.pdf

Manwell, J., McGowan, J., & Rogers, A. (2010). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application* (2nd ed.). https://ee.tlu.edu.vn/Portals/0/2018/NLG/Sach_Tieng_Anh.pdf

Martínez, N., Rojas, J., & Richmond, G. (2022). Desarrollo y prueba de un sistema para sensar de manera remota la velocidad del viento. *Tecnología En Marcha*, *35*, 33–45. https://doi.org/https://doi.org/10.18845/tm.v35i7.6331

Martínez, R. (2022). *Estudio experimental y numérico del perfil aerodinámico con curvatura NACA 4412*. Universidad Politécnica de Cartagena.

Más, P. (2022). *Diseño de un túnel de viento para la cámara anecoica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid* [Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/73239/

Mayoral, G. (2021). *Estudio de la dinámica de flujo alrededor de un perfil aerodinámico a altos Reynolds* [Universitat Politècnica de Catalunya]. https://upcommons.upc.edu/handle/2117/353105?show=full

Mayorga, P., Fernández, J., Zambrana, P., Fernández, J. J., García, A., & Ortega, J. (2019). Intelligent control for improving the efficiency of a hybrid semi-submersible platform with wind turbine and wave energy converters: Fuzzy control system for the wind turbine. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, *16*(4), 480–491. https://doi.org/10.4995/riai.2019.10972

Mera, L. (2025). *Dimensionalización y simulación de un túnel de viento aplicando CFD bajo las condiciones atmosféricas de Riobamba* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/23727

Mott, R., & Untener, J. (2015). *Mecánica de Fluidos* (7th ed.). https://www.academia.edu/43741728/Mecanica_de_Fluidos_7a_ed_Mott

Munson, B., Young, D., & Okiishi, T. (1999). *Fundamentos de Mecánica de Fluidos* (Limusa, Ed.; 1ra ed.). https://es.scribd.com/document/482357307/Fundamentos-de-Mecanica-de-Fluidos-Munson-Young-Okiishi-1ed-pdf

Murillo, B. (2022). *Análisis aerodinámico y manufactura aditiva de alerones de competencia mediante dinámica de fluidos computacional* [Universidad Internacional del Ecuador]. https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/5651

Naseem, A., Uddin, E., Ali, Z., Aslam, J., Shah, S. R., Sajid, M., Zaidi, A. A., Javed, A., & Younis, M. Y. (2020). Effect of vortices on power output of vertical axis wind turbine (VAWT). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *37*. https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100586

Noriega, N. (2021). *Caracterización cualitativa y cuantitativa de perfiles aerodinámicos recortados a bajos números de Reynolds* [Universidad de los Andes]. https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/26b0209a-5c02-48f4-80c1-89af114132ea

Ochoa, D. (2019). *DANNY_OCHOA_CORREA* [Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/56530/

Pabón, C., Flórez, E., & Serrano, J. C. (2019). Design of the blade of a low-power horizontal axis wind turbine. *Bistua:Revista de La Facultad de Ciencias Básicas*, *17*. https://doi.org/https://doi.org/10.24054/bistua.v17i1.288

Palacios, F., & Ayala, M. (2023). Diseño de sistema de control de ángulo pitch en aerogeneradores mediante control pi adaptativo por lógica difusa. *Revista Científica de La UCSA*, *10*(1), 91–114. https://doi.org/10.18004/ucsa/2409-8752/2023.010.01.091

Palacios, K., & Santa, A. (2023). *DESARROLLO DE UN BANCO DE CONTROL DE ÁNGULO DE ATAQUE PARA PERFILES AERODINÁMICOS EN UN TÚNEL DE VIENTO.* [Universidad Tecnológica de Pererira]. https://repositorio.utp.edu.co/entities/publication/6e512ec7-e952-44bd-9c02-3629fc3504dc

Pérez, R. (2019). *Modelado CFD de Turbinas de Eje Vertical para Aprovechamiento de Corrientes Fluviales* [Universidad de Valladolid]. https://uvadoc.uva.es/handle/10324/36741

Polo, R. (2021). *Proyecto y diseño de un Túnel de viento docente para el aula de automoción de la EPSEM* [Universitat Politècnica de Catalunya]. http://hdl.handle.net/2117/347953

Prieto, J. (2016). *Máquinas e Instalaciones Hidráulicas y Eólicas* (Primera).

Rao, K. R. (2019). *Wind Energy for Power Generation Meeting the Challenge of Practical Implementation*. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-75134-4

Rayhan, A. M., Hossain, M. S., Mim, R. H., & Ali, M. (2024). Computational and experimental study on the aerodynamic performance of NACA 4412 airfoil with slot and groove. *Heliyon*, *10*(11). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31595

Rico, J. de D. (2020). *Aerodynamic analyses of diamond shape air-foil at supersonic speed using CFD* [Universidad de Cantabria]. https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/20259

Rodríguez, D., & Muñoz, C. (2017). *APLICACIÓN DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA COMO MÉTODO DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVO DE UN TÚNEL DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD.APLICACIÓN DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA COMO MÉTODO DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVO DE UN TÚNEL DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD.* [Fundación Universitaria Los Libertadores]. https://repository.libertadores.edu.co/items/ec4cc816-04f5-4427-9672-5deecd967a24

Rodríguez, J., & Espejo, D. (2019). *OPTIMIZACIÓN DE UN PERFIL AERODINÁMICO PARA UNA AERONAVE CATEGORÍA COMMUTER TIPO STOL UTILIZANDO TÉCNICAS NO TRADICIONALES* [Fundación Universitaria Los Libertadores]. https://repository.libertadores.edu.co/items/3d4f7e95-0ec2-46f6-854d-50efd8e5f09f

Roncancio, N., & Reyes, A. (2018a). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO SUBSÓNICO DE CIRCUITO ABIERTO* [Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. https://repository.udistrital.edu.co/items/41016441-615e-4122-bcbd-c628f79bb850

Roncancio, N., & Reyes, A. (2018b). *Diseño y Construcción de un Túnel de Viento Subsónico de Circuito Abierto* [Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. https://repository.udistrital.edu.co/items/41016441-615e-4122-bcbd-c628f79bb850

Saeed, S., Abdulla, S., Shaheen, S., Saeed, A., Thaher, A., & Khan, S. H. (2025). Optimizing NACA airfoils for sustainable medical delivery UAVs: Aerodynamic analysis. *Progress in Engineering Science*, *2*(2). https://doi.org/10.1016/j.pes.2025.100067

Santiago, K. (2024). *DISEÑO DE AEROGENERADOR TIPO DARRIEUS HELICOIDAL PARA SU OPERACIÓN EN EL CAMPUS PALMAS DE LA UNIVERSIDAD EIA* [Universidad EIA]. https://repository.eia.edu.co/entities/publication/97deea26-f79e-4e68-ba65-925752295df3

Streeter, V., Wylie, B., & Bedford, K. (2000). *Mecánica de fluidos* (J. Saldarriaga & G. Santos, Trans.; 9th ed.). https://archive.org/details/mecanicadelosfluidosstreeter9edicion/page/n323/mode/2up

Suárez, F. (2024). *Montaje experimental para análisis de generadores de vórtice pasivos en un perfil aerodinámico.* [Universidad de los Andes]. https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/d9d882dd-b89c-4fe7-9f54-c9efaae664b3

Tejada, L. (2020). *Estudio de algunos perfiles aerodinámicos*. https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/e979fce7-7713-4f96-a8e1-8370ceb06440/content

Topa, C. (2017). *Análisis de instrumentación y simulación de un túnel de viento subsónico de ciclo abierto* [Escuela Politécnica Nacional]. https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19133

Trauernicht, N., Miguda, H., & Martinetti, A. (2024). Design guidelines for HAWT / VAWT decision-making in the context of underserved communities. *Procedia CIRP*, *128*, 448–453. https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.03.025

Vadhyar, A., Sridhar, S., Reshma, T., & Radhakrishnan, J. (2024). A critical assessment of the factors associated with the implementation of rooftop VAWTs: A review. *Energy Conversion and Management: X*, *22*. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100563

Valdez, M., Preidikman, S., & Flores, S. (2018). Aerodinámica de Perfiles con Múltiples Superficies de Control de Flujo. *Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *5*(1). https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/89530/CONICET_Digital_Nro.545cbdce-d9aa-4785-a7c4-7e56da020ab6_A.pdf?sequence=2

Valencia, R., Fierros, O., Coco, L., & Muñoz, J. (2021). MODELING AND STUDY OF A PRINTED CIRCUIT HEAT EXCHANGER FOR BRAYTON POWER CYCLES USING SUPERCRITICAL CO2 MIXTURES AS WORKING FLUID. *Conference Proceedings of the European SCO2 Conference*, 48–57. https://doi.org/10.17185/duepublico/73946

Villacrés, H., & Sumi, C. (2017). *Diseño aerodinámico y prototipado del vehículo Interprovincial ALFA-700 para Metálicas Pillapa* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. https://dspace.espoch.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/09ec9dee-41c4-4bc5-85ee-07bc88592866/content

Villarrubia, M. (2013). *Ingeniería de la Energía Eólica* (Alfaomega, Ed.; 1st ed.). https://anyflip.com/xzcp/pugt/basic

White, F. (2004). *Mecánica de Fluidos* (S. A. Mcgraw-hill / Interamericana de España, Ed.; 5ta ed.). https://www.casadellibro.com/libro-mecanica-de-fluidos-5-ed/9788448140762/958028?srsltid=AfmBOorcmS3R3zZ3eQqhVG2yTeMctkN9zEBY18QDC2S_VyzXqcPceaF_

Yalama, C. (2017). *ESTUDIO PARAMÉTRICO Y SIMULACIÓN DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES (CFD) DE LOS EFECTOS DE INTEGRACIÓN AERODINÁMICOS ENTRE EL SISTEMA DE PROPULSIÓN Y FUSELAJE PARA UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO (UAV) UTILIZADO EN AGRICULTURA* [Escuela Politécnica Nacional]. https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19348/1/CD-8725.pdf

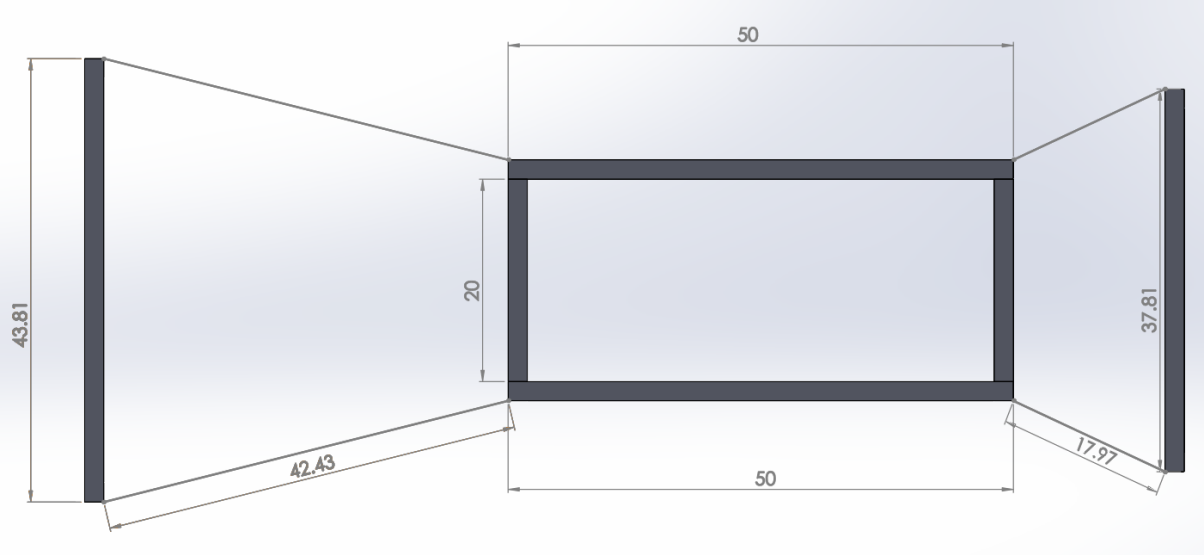
Yancachajlla, U., & Vilca, O. (2022). Caracterización del viento con la función de Weibull para una zona altoandina, Laraqueri - Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, *24*(3), 190–198. https://doi.org/10.18271/ria.2022.439

Yang, S., Liu, Z., & Li, Y. (2025). Numerical simulation of the aerodynamic characteristics of an HAWT with a circular hole at the blade tip. *Journal of Ocean Engineering and Science*. https://doi.org/10.1016/j.joes.2025.10.001

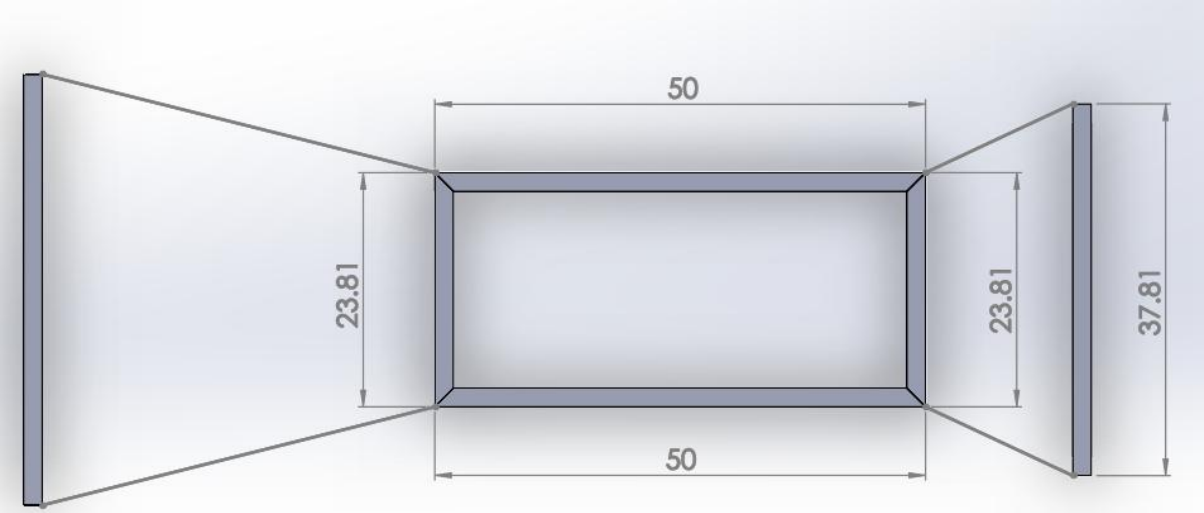
ANEXO 1

Estructura túnel de viento

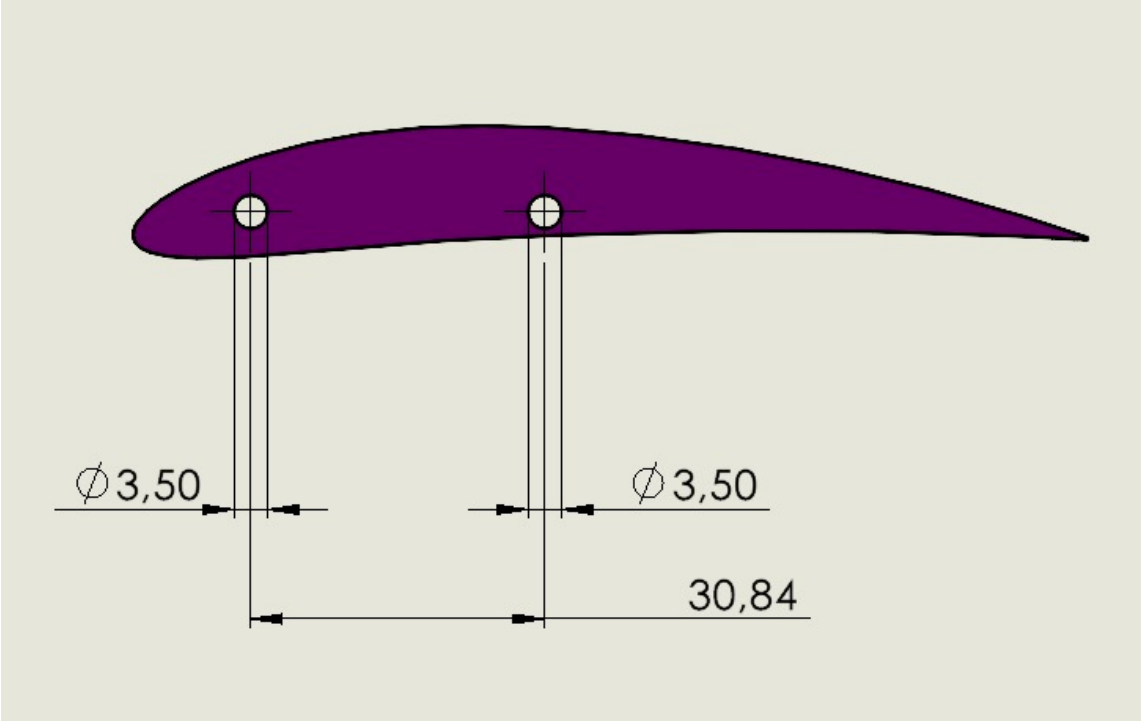
- Vista lateral



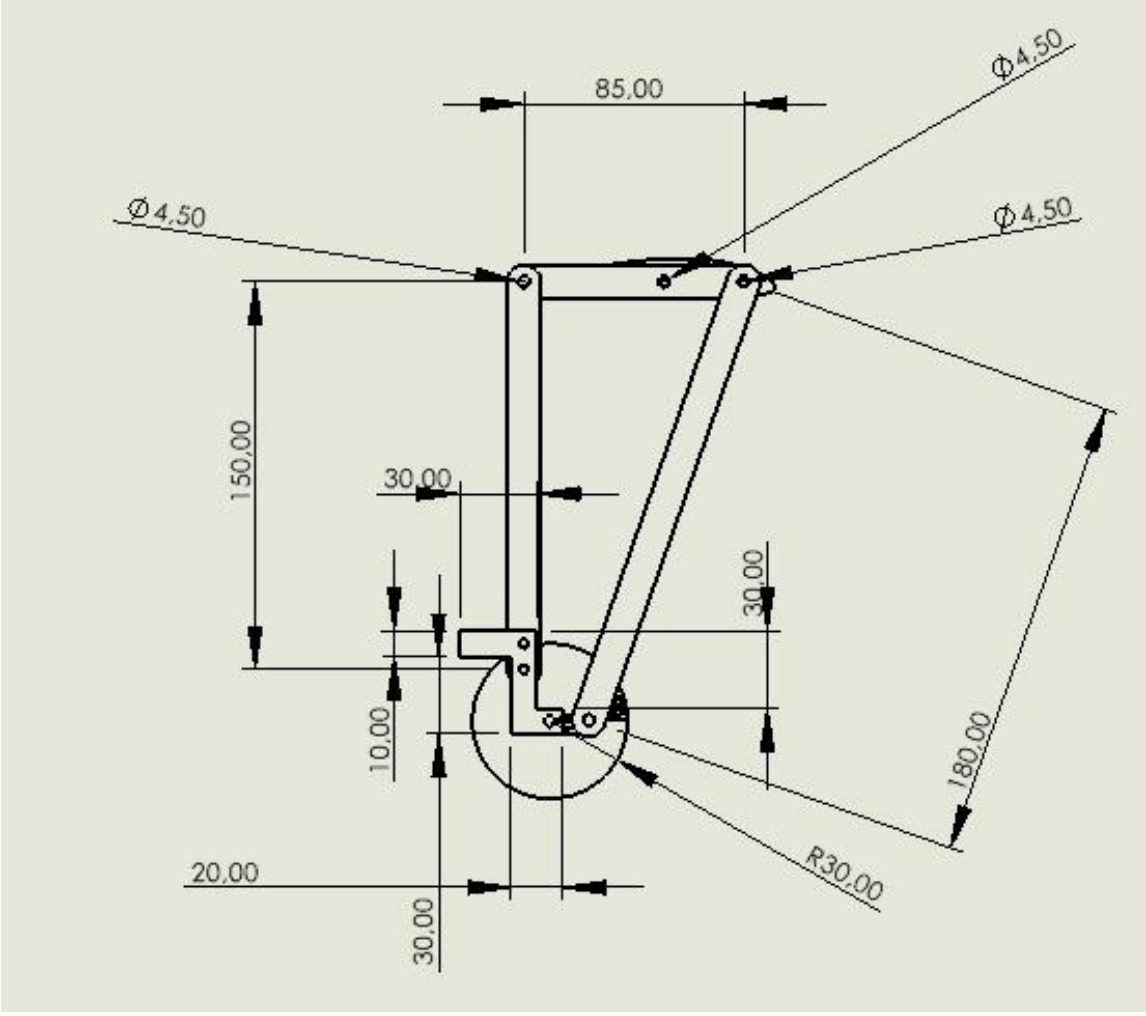
- Vista superior



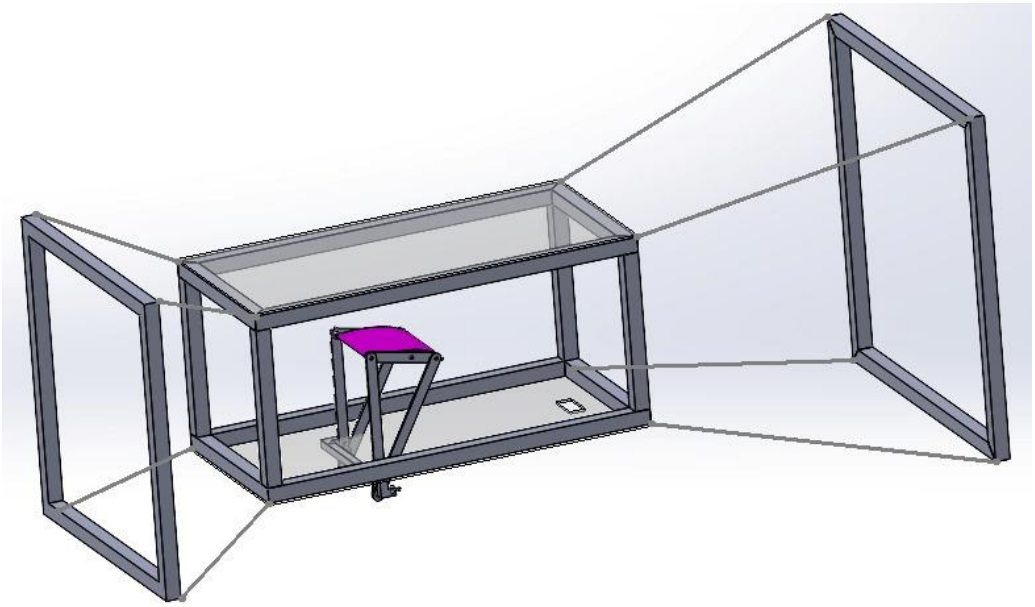
Perfil NACA 6412



Mecanismo Grashof



Vista completa



ANEXO 2

Link Código Python

https://drive.google.com/drive/folders/1ivxNsNh5H9zkFXRjaQAjeM9MDfefY7Rz

ANEXO 3

Tablas de resultados

1. **Tabla para selección de ángulo óptimo**

Ángulo de ataque [°]	V [m/s]	L [N]	D [N]	Cl	Cd	L/D	**ε**	**Polar Cl**	**Polar Cd**	**Re**
0										
4										
8										
12										
16										

2. **Tabla para variación de velocidad con ángulo óptimo**

Alfa [°]	V teórica [m/s]	V promedio [m/s]	L [N]	D [N]	Cl	Cd	L/D	**ε**	**Polar Cl**	**Polar Cd**	**Re**

ANEXO 4

Guía de practica

GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO

ASIGNATURA: Energía Eólica Aplicada
NIVEL: 6to
DOCENTE: Paul M. Tafur Escanta PhD.

Tema: Evaluación aerodinámica del perfil NACA 6412 en túnel de viento

1. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar experimentalmente el comportamiento aerodinámico del perfil NACA 6412 en un túnel de viento automatizado para distintas velocidades de flujo.

2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los coeficientes aerodinámicos de sustentación (Cl) y arrastre (Cd) en función del ángulo de ataque ((0°, 4°, 8°,12° y 16°) y la velocidad del viento.
- Calcular la calidad aerodinámica ($\varepsilon = Cd/Cl$) para identificar el ángulo de ataque óptimo del perfil.
- Analizar la influencia del número de Reynolds en el comportamiento del perfil.

2. INTRODUCCIÓN

El estudio de perfiles aerodinámicos es fundamental para el diseño eficiente de aerogeneradores, ya que la geometría del perfil determina directamente las fuerzas de sustentación y arrastre. El perfil NACA 6412, perteneciente a la serie de 4 dígitos, se caracteriza por su curvatura máxima del 6% de la cuerda, ubicada al 40% de la cuerda desde el borde de ataque, y un espesor máximo del 12%, lo que le confiere un excelente desempeño en aplicaciones eólicas. En esta práctica se utiliza un túnel de viento subsónico de circuito a varias velocidades de flujo. Se analiza el perfil NACA 6412 variando el ángulo de ataque (0° a 16°) y la velocidad del flujo (3, 4.07 y 4.89 m/s). Los datos experimentales se procesan mediante una interfaz desarrollada en Python que calcula automáticamente los coeficientes aerodinámicos, el número de Reynolds y la calidad aerodinámica, permitiendo identificar el ángulo de ataque óptimo y validar los resultados con simulaciones CFD.

3. EQUIPO Y MATERIALES

- Túnel de viento y sección de prueba.
- Anemómetro digital UT363BT junto con la aplicación iENV donde se guardan los datos de velocidad.
- Dimmer para regular la velocidad de análisis.
- Mecanismo Grashof como soporte del perfil y variador del ángulo de ataque.
- Computadora/hojas de datos.

4. CONDICIONES DE SEGURIDAD

- No se usan dispositivos ni software que impliquen riesgos físicos
- Proteger dedos/ropa de partes móviles; usar gafas.
- Asegurar el perfil NACA 6412 firmemente en el soporte antes de encender el ventilador.
- Desconectar la alimentación antes de modificar el ángulo de ataque o cambiar el perfil.

5. PROCEDIMIENTO

1. Preparación y verificación previa (10–15 min)

- **Seguridad**: gafas, cabello recogido, sin objetos sueltos. Coloca mallas de protección si el túnel las tiene.
- **Inspección del perfil**: verificar que el perfil NACA 6412 esté en buenas condiciones, sin deformaciones ni imperfecciones y que este bien asegurado en la base de la sección de pruebas. Registrar la cuerda (c) y la envergadura del perfil y calcular el área de referencia (S=c * b) para colocar en el código.
- **Configuración de instrumentación**:
  - **Velocidad del aire**: Conectar el anemómetro vía Bluetooth por medio de la aplicación iENV.
  - **Ángulo de ataque**: Ajustar el soporte giratorio al ángulo deseado (iniciar en 0°).
- **Condiciones ambientales**: Medir temperatura T (°C) y presión para estimar densidad del aire ρ.

2) Diseño de corridas

- **Niveles de velocidad V**: define al menos 3 niveles espaciados (ej.: 2, 3, 4, 5 m/s).
- **Réplicas**: realiza ≥3 réplicas por nivel (mismo ajuste de V).
- **Régimen estable**: en cada punto de operación, espera 5-10s hasta que V se estabilice antes de registrar.

3) Ejecución y toma de datos

Para cada nivel de V y cada réplica:

- Ajusta el ventilador hasta alcanzar la velocidad objetivo (lee V en el plano de prueba).
- Registra el ángulo de ataque analizado además de las mediciones en la aplicación según el criterio necesario (N° datos, tiempo de análisis, unidad de medida, etc.)
- **Observaciones**: vibraciones, turbulencia visible, comportamiento del flujo de humo (si se dispone).

4) Procesamiento con interfaz de Python

- Exportar los datos desde la aplicación iENV del anemómetro a un archivo .xlsx o .csv que contenga la columna V_inf_ms con los datos de velocidad.
- Abrir la interfaz en Python y seleccionar el modo de operación (individual para todos los ángulos y óptimo para el ángulo óptimo).
- Cargar el archivo con las velocidades medidas y asignar el ángulo de ataque correspondiente.
- El programa calculará automáticamente: velocidad promedio, coeficiente de arrastre (Cd), coeficiente de sustentación (Cl), número de Reynolds (Re), y calidad aerodinámica (Cd/Cl y Cl/Cd).
- Exportar los resultados a un archivo Excel para su análisis posterior.}

5) Análisis complementario

- Graficar Cl vs α, Cd vs α y la polar aerodinámica: Cl vs Cd.

- Identificar el ángulo de ataque óptimo (donde Cd/Cl es mínimo o Cl/Cd es máximo).
- Comparar los resultados experimentales con los obtenidos en la simulación CFD en Ansys Fluent.

6.CUESTIONARIO DE INVESTIGACIÓN

1. ¿Cómo varían los coeficientes de sustentación (Cl) y arrastre (Cd) del perfil NACA 6412 al aumentar el ángulo de ataque desde 0° hasta 16°? ¿Qué fenómeno físico explica el incremento desproporcionado del arrastre a partir de 8°?

2. ¿Cuál es el ángulo de ataque óptimo identificado experimentalmente para el perfil NACA 6412? ¿Cómo se relaciona este valor con la calidad aerodinámica (Cd/Cl)?

3. ¿Qué diferencias se observan entre los resultados experimentales (velocidades de 3–5 m/s) y los resultados de simulación CFD (velocidades de hasta 10 m/s)? ¿A qué factores se atribuyen estas diferencias?

4. ¿Cómo influye el número de Reynolds en el comportamiento del flujo alrededor del perfil? ¿El flujo en la sección de pruebas es laminar o turbulento? Justifique con los valores de Re obtenidos.

5. ¿Qué limitaciones presenta el túnel de viento construido que impiden alcanzar velocidades superiores a 5 m/s? Proponga mejoras para incrementar su capacidad.

7.RESULTADOS

Completa la siguiente tabla:

Tabla de Datos para selección del ángulo de ataque óptimo

Ángulo de ataque [°]	V [m/s]	L [N]	D [N]	Cl	Cd	L/D	**ε**	**Polar Cl**	**Polar Cd**	**Re**
0										
4										
8										
12										
16										

Tabla de datos para variación de velocidad con ángulo de ataque óptimo

Alfa [°]	V teórica [m/s]	V promedio [m/s]	L [N]	D [N]	Cl	Cd	L/D	**ε**	**Polar Cl**	**Polar Cd**	**Re**

8. ACTIVIDAD DE APLICACIÓN (PARA INFORME)

- Presentar los datos promediados de las mediciones realizadas para cada combinación velocidad-ángulo.
- Analizar las gráficas resultantes de la interfaz: Cl vs α (ángulo de ataque), Cd vs α, polar aerodinámica (Cl vs Cd), calidad aerodinámica (Cd/Cl) vs α, calidad aerodinámica (Cd/Cl) vs V para α óptimo y Re vs Velocidad de viento.
- Comparar los resultados experimentales con los valores obtenidos de la simulación CFD en Ansys Fluent (referencia: velocidad 10 m/s, $\alpha = 4°$: $Cl \approx 0.68$, $Cd \approx 0.043$, $\varepsilon \approx 0.0635$).
- Identificar fuentes de error experimentales.
- Proponer mejoras al montaje o procedimiento.

9.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES (PARA INFORME)

Escriba las conclusiones y recomendaciones acerca del procedimiento realizado basado en el cumplimiento de los objetivos. Incluir:

- Determinación del ángulo de ataque óptimo del perfil NACA 6412.

- Comparación entre resultados experimentales y de simulación CFD.

- Validación del túnel de viento automatizado como herramienta didáctica.

- Recomendaciones para mejorar la precisión y alcanzar mayores velocidades en futuras prácticas.