



UNIVERSIDAD LAICA “ELOY ALFARO” DE MANABÍ

Unidad Académica:

Unidad Académica de Formación Técnica y Tecnológica.

Carrera:

Tecnología Superior en Electromecánica .

Título:

Análisis y simulación del flujo de aire en un túnel de viento para pruebas aerodinámicas en la carrera de Electromecánica en la ULEAM Extensión El Carmen.

Autores:

Cevallos Álava Daniel Wladimir
Fajardo Vergara Steveen Manuel

Tutor(a)

Ing. Fernando López, MSc.

El Carmen, Septiembre de 2025.

	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-05-IT-001-F-004
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE LAS CARRERAS TÉCNICAS Y TECNOLÓGICAS	VERSIÓN: 3
		Página 1 de 1

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor(a) de la Extensión El Carmen de la carrera de Electromecánica de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría del estudiante Cevallos Álava Daniel Wladimir, legalmente matriculado/a en la carrera de Electromecánica, período académico 2025(1), cumpliendo el total de 144 horas, cuyo tema del proyecto es "Análisis y simulación del flujo de aire en un túnel de viento para pruebas aerodinámicas en la carrera de electromecánica en la uleam extensión El Carmen."

El presente trabajo de titulación ha sido desarrollado en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Lugar, 8 de diciembre de 2025.

Lo certifico,



Ing. Fernando López, MSc.
Docente Tutor(a)
Área: Electromecánica

Nota 1: Este documento debe ser realizado únicamente por el/la docente tutor/a y será receptado sin enmendaduras y con firma física original.

Nota 2: Este es un formato que se llenará por cada estudiante (de forma individual) y será otorgado cuando el informe de similitud sea favorable y además las fases de la Unidad de Integración Curricular estén aprobadas.

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Quien(es) suscribe(n) la presente:

Cevallos Álava Daniel Wladimir, Fajardo Vergara Steven Manuel

Estudiante(s) de la Carrera de Tecnología Superior en Electromecánica , declaro(amos) bajo juramento que el siguiente proyecto cuyo título: "Análisis y simulación del flujo de aire en un túnel de viento para pruebas aerodinámicas en la carrera de Electromecánica en la ULEAM Extensión El Carmen.", previa a la obtención del Título de Tecnólogo en Electromecánica, es de autoría propia y ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros y consultando las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

El Carmen, Septiembre de 2025.



Cevallos Álava Daniel Wladimir



Fajardo Vergara Steven Manuel



APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Los miembros del Tribunal Examinador aprueban el Trabajo de Titulación con modalidad Proyecto Integrador, titulado: "Análisis y simulación del flujo de aire en un túnel de viento para pruebas aerodinámicas en la carrera de Electromecánica en la ULEAM Extensión El Carmen" de su(s) autor(es): Cevallos Álava Daniel, Fajardo Vergara Steveen de la Carrera "Tecnología Superior en Electromecánica ", y como Tutor(a) del Trabajo el Ing. Fernando López, MSc.

El Carmen-Septiembre 2025



Ing. Bladimir Mora, Mag.
DECANO(A)



Ing. Fernando López, MSc.
TUTOR(A)



Ing. Wladimir Minaya, Mag.
PRIMER MIEMBRO TRIBUNAL



Ing. Danilo Arévalo, Mag.
SEGUNDO MIEMBRO TRIBUNAL

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a quienes han sido pilares fundamentales en la realización de esta tesis y en cada etapa de este proceso académico.

A mi madre, por ser siempre mi mayor ejemplo de fortaleza, por su amor incondicional y por su apoyo constante en los momentos más difíciles. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia.

A mis hijos, quienes son mi mayor inspiración y motivo para seguir adelante. Gracias por su paciencia, por comprender mis ausencias y por llenarme de amor en cada paso del camino. Todo esto es también para ustedes.

Al tutor de esta tesis, Ing. Fernando López, MSc. Por su guía, disposición y valiosos aportes durante el desarrollo de este trabajo. Su acompañamiento fue clave para que este proyecto llegara a buen término.

A todos ustedes, mi eterno agradecimiento.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, con todo mi amor y gratitud:

A mi madre, por ser mi fuerza, mi guía y mi refugio en los momentos de incertidumbre. Gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Este logro también es tuyo.

A mis hijos, por darme el mayor motivo para seguir adelante. Cada página escrita, cada desvelo y cada esfuerzo tiene su razón en ustedes. Son mi mayor orgullo y mi motor de vida.

Este logro es una muestra de que los sueños se alcanzan con amor, constancia y fe.

RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo principal analizar y simular el flujo de aire en un túnel de viento diseñado para pruebas aerodinámicas en el contexto académico de la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Extensión El Carmen. La investigación surge ante la necesidad de contar con herramientas experimentales que permitan fortalecer la formación técnica en áreas como la dinámica de fluidos y la simulación computacional, fundamentales en la ingeniería moderna.

El estudio se desarrolló mediante tres ejes principales: la recopilación y análisis bibliográfico de fundamentos aerodinámicos y metodologías de simulación; el diseño y modelado tridimensional de un túnel de viento utilizando software CAD (SolidWorks); y la simulación del comportamiento del flujo de aire mediante herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD), como ANSYS Fluent y SolidWorks Flow Simulation. Se emplearon además métodos analíticos, computacional y de elementos finitos para validar los resultados.

Los resultados obtenidos permitieron identificar parámetros clave como la resistencia aerodinámica, la sustentación y la distribución del flujo, logrando una caracterización detallada del comportamiento del aire en la sección de pruebas del túnel. Asimismo, se evidenció la viabilidad técnica y pedagógica de implementar un modelo funcional a escala dentro de la institución, promoviendo el aprendizaje práctico, el desarrollo de competencias en diseño e interpretación de datos aerodinámicos y el uso de tecnologías emergentes alineadas a la Industria 4.0.

Esta propuesta representa un aporte significativo al entorno académico, brindando una solución replicable de bajo costo que fortalece la experimentación y el análisis aerodinámico en escenarios controlados, fundamentales para la formación integral de los futuros tecnólogos en Electromecánica.

PALABRAS CLAVE

Túnel de viento; simulación CFD; diseño asistido por computadora (CAD); aerodinámica; SolidWorks; ANSYS Fluent.

ABSTRACT

This thesis aims to analyze and simulate airflow within a wind tunnel designed for aerodynamic testing in the academic context of the Electromechanical Technology program at Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, El Carmen Extension. The research responds to the need for experimental tools that enhance technical training in fluid dynamics and computational simulation—key areas in modern engineering.

The study is structured around three main components: an extensive literature review on aerodynamic principles and simulation methodologies; the 3D design and modeling of a wind tunnel using CAD software (SolidWorks); and the simulation of airflow behavior using Computational Fluid Dynamics (CFD) tools such as ANSYS Fluent and SolidWorks Flow Simulation. Analytical, computational modeling, and finite element methods were employed to validate the results.

The results allowed the identification of critical parameters such as drag, lift, and flow distribution, achieving a detailed characterization of air behavior in the wind tunnel's test section. Additionally, the feasibility of implementing a functional scaled model within the university was demonstrated, promoting practical learning, skill development in aerodynamic data analysis and design, and the application of emerging technologies aligned with Industry 4.0.

This proposal represents a significant academic contribution, providing a low-cost, replicable solution that strengthens experimental and aerodynamic analysis in controlled environments—an essential component of comprehensive training for future electromechanical technologists.

KEYWORDS

Wind tunnel; CFD simulation; computer-aided design (CAD); aerodynamics; SolidWorks; ANSYS Fluent.

ÍNDICE

CERTIFICACION DEL TUTOR.....	¡Error! Marcador no definido.
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	III
AGRADECIMIENTO	IV
DEDICATORIA	V
RESUMEN	VI
PALABRAS CLAVE	VI
ABSTRACT	VII
KEYWORDS	VII
ÍNDICE.....	VIII
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PROBLEMA	2
1.2. JUSTIFICACIÓN	3
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. METODOLOGÍA.....	4
1.4.1. Procedimiento.....	4
1.4.2. Técnicas	5
1.4.3. Métodos	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. DEFINICIONES	8
2.2. ANTECEDENTES	10
2.3. TRABAJOS RELACIONADOS	12
CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA PROPUESTA	14
3.1. DESARROLLO	14
3.1.1. Descripción de la propuesta.....	14
3.1.1. Etapas	15
3.1.1. Presupuesto	17
3.2. RESULTADOS	17

• Proceso de funcionamiento del Túnel de viento	17
• Propuesta de diseño de túnel de viento	18
3.2.2. Resultados del diseño	19
• Diseño estructural asistido por computadora (CAD)	20
• Protocolo de diseño	20
• Configuración módulo de Flow Simulation.....	21
3.2.3.1. Configuración condiciones de contorno	22
• Mallado	22
• Resultados del análisis.....	23
• Interpretación de los resultados.....	26
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	27
4.1. CONCLUSIONES	27
4.2. RECOMENDACIONES	28
BIBLIOGRAFÍA.....	29
Determinación del tipo de flujo	1
• Determinación del caudal	3
• Determinación de la sección de contracción	3
• Cálculo de presiones de contracción	5
Difusor	5

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1.....	18
Figura 2.....	1
Figura 3.....	4
Figura 4.....	20
Figura 5.....	21
Figura 6.....	21
Figura 7.....	21
Figura 8.....	23
Figura 9.....	24
Figura 10.....	25
Figura 11.....	26

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	1
Tabla 2	19

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El túnel de viento constituye una herramienta clave para el estudio y la caracterización del comportamiento aerodinámico de modelos y prototipos en condiciones controladas. Mediante la generación de un flujo de aire uniforme y regulable, este dispositivo permite reproducir de forma realista las condiciones de régimen laminar y turbulento que experimentan las superficies sometidas al viento, facilitando la medición precisa de fuerzas, coeficientes de presión y distribución de velocidades (Barlow, 1999). Además, los túneles de viento ofrecen la posibilidad de analizar el efecto de variables geométricas y de escala sobre el flujo, lo cual es fundamental tanto para el diseño de vehículos y estructuras como para la validación de modelos numéricos de simulación (Anderson, 2010).

Complementariamente, la simulación numérica del flujo mediante software de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permite analizar de manera detallada y no intrusiva las características del campo de velocidades y presiones dentro del túnel de viento, superando las limitaciones experimentales asociadas a la instrumentación física (Versteeg, 2007). Gracias a la discretización de las ecuaciones de Navier–Stokes y a la implementación de modelos de turbulencia es posible reproducir virtualmente distintos regímenes de flujo y geometrías complejas, optimizando iterativamente el diseño antes de llevar a cabo pruebas en laboratorio (Ferziger, 2020).

En años recientes, diversos estudios han profundizado en la integración de ensayos en túnel de viento con simulaciones CFD para mejorar la fidelidad y calibración de los modelos. Por ejemplo, la NASA presentó un informe técnico que describe metodologías de calibración basadas en CFD, subrayando la importancia de caracterizar con precisión tanto la geometría física del túnel como las condiciones termodinámicas para garantizar resultados fiables (NASA, 2023). Por ejemplo, (Li, 2023) emplearon simulaciones de Gran Escala (LES) con mallado dinámico en OpenFOAM para resolver estructuras turbulentas de pequeña escala en flujos de alta velocidad, mejorando la predicción de fluctuaciones de presión en el modelo experimental. De forma complementaria, (García, 2024) compararon modelos RANS, DES y PANS en ANSYS Fluent para estudiar el efecto de distintas aproximaciones de turbulencia en la capa límite de

placas delgadas, determinando que los esquemas híbridos DES ofrecen un equilibrio óptimo entre precisión y costo computacional. Estos trabajos consolidan la importancia de las herramientas CFD avanzadas como eje central del análisis y la optimización de ensayos aerodinámicos en túneles de viento.

El análisis y la simulación del flujo de aire en un túnel de viento reviste una importancia crítica para el avance tecnológico y la competitividad industrial, al permitir optimizar el desempeño aerodinámico de vehículos, aeronaves y estructuras antes de la fabricación física. Al combinar ensayos experimentales con predicciones CFD, se reducen considerablemente los plazos y costos asociados al diseño de prototipos, al mismo tiempo que se mejora la precisión en la estimación de fuerzas, momentos y coeficientes de arrastre y sustentación (Anderson, 2010).

En el ámbito de la Tecnología Superior en Electromecánica, el estudio del flujo de aire en túneles de viento y su simulación CFD permite a los estudiantes integrar conocimientos de mecánica, electrónica y control en proyectos reales. Este enfoque multidisciplinario fortalece la comprensión de fenómenos físicos como la dinámica de fluidos y la transferencia de energía al mismo tiempo que desarrolla habilidades prácticas en instrumentación, adquisición de datos y análisis de resultados. Al aplicar metodologías experimentales y numéricas, los futuros técnicos adquieren competencias esenciales para diseñar y optimizar sistemas de ventilación, bombas, sopladores y otros equipos electrodinámicos, contribuyendo así a la eficiencia energética y a la innovación tecnológica en la industria local y regional.

1.1. PROBLEMA

Los avances en técnicas experimentales y numéricas para el estudio de flujos aerodinámicos han permitido importantes mejoras en el diseño y optimización de componentes mecánicos; sin embargo, persisten desafíos vinculados a la alta inversión de tiempo y recursos que requiere la calibración simultánea de modelos CFD y ensayos en túnel de viento. Las discrepancias entre los resultados experimentales y las predicciones numéricas debidas a errores de mallado, simplificaciones en los modelos de turbulencia o condiciones de contorno imprecisas generan incertidumbre en la interpretación de datos y limitan la capacidad de iteración rápida en el desarrollo de prototipos. Además, la falta de

protocolos estandarizados para la validación cruzada encarece los procesos de homologación y retrasa la toma de decisiones en proyectos industriales y académicos.

En el proceso de diseño de componentes aerodinámicos, la inexistencia de un flujo de trabajo integrado entre la etapa de simulación CFD y la validación experimental en túnel de viento impide iterar rápidamente sobre las geometrías y parámetros de diseño. Esta brecha ocasiona prototipos costosos, prolonga los tiempos de desarrollo y debilita la confiabilidad de las predicciones aerodinámicas, al no contar con un mecanismo estandarizado que garantice la coherencia entre los modelos numéricos y los resultados físicos.

1.2. JUSTIFICACIÓN

El uso de simulaciones numéricas de dinámica de fluidos (CFD) en un túnel de viento permite reproducir con alta fidelidad las condiciones de flujo real y cuantificar parámetros aerodinámicos como distribuciones de presión, patrones de separación y coeficientes de arrastre sin los costos y tiempos asociados a múltiples ensayos físicos. Esta estrategia de modelado computacional facilita la exploración sistemática de variables de diseño (geometría, velocidad de entrada, rugosidad de superficie) y la optimización iterativa de prototipos virtuales antes de la construcción de modelos a escala. Para los estudiantes de Electromecánica, la integración de entornos CFD en el plan de estudios refuerza competencias clave: formulación de mallas adecuadas, selección de esquemas numéricos, análisis de convergencia y validación de resultados contra datos experimentales.

La adopción de tecnologías avanzadas de simulación CFD y automatización en un túnel de viento responde a la necesidad de incorporar herramientas de última generación que optimicen tanto la adquisición como el procesamiento de datos aerodinámicos. En primer lugar, el uso de solvers paralelos acelerados por GPU permite reducir drásticamente los tiempos de cómputo pasando de días a horas en simulaciones de alta resolución, lo que facilita iteraciones rápidas de diseño y validación (Guide., 2020). Asimismo, la integración de sistemas de adquisición de datos en tiempo real, basados en IoT y protocolos de Industria 4.0, habilita la monitorización continua de parámetros clave (presión, velocidad, temperatura) y

la generación automática de informes digitales, incrementando la reproducibilidad y trazabilidad de los ensayos (Kritzinger, 2018).

Aunque la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica no se adscribe formalmente a una línea de investigación específica, sus fundamentos técnicos y prácticos se integran plenamente en la línea de “Ingeniería, Industria, Construcción, Urbanismo y Arquitectura para un Desarrollo Sustentable y Sostenible”. En este marco, los proyectos y prácticas formativas enfatizan la optimización de procesos energéticos, la implementación de sistemas mecánicos eficientes y la reducción de residuos industriales, promoviendo soluciones innovadoras que equilibren la productividad con la preservación ambiental.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Analizar y simular el flujo de aire en un túnel de viento para pruebas aerodinámicas en la carrera de Electromecánica en la ULEAM Extensión El Carmen.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar una búsqueda bibliográfica exhaustiva sobre los fundamentos de la aerodinámica, el diseño de túneles de viento y las simulaciones computacionales aplicadas al estudio del flujo de aire.
- Realizar el análisis y la simulación del flujo de aire en un túnel de viento mediante el uso de herramientas computacionales
- Analizar y validar los resultados obtenidos mediante software especializado.

1.4. METODOLOGÍA

1.4.1. Procedimiento

La metodología se inicia con una búsqueda bibliográfica exhaustiva, recopilando información teórica y técnica sobre túneles de viento, fundamentos de aerodinámica y metodologías de simulación computacional. Se revisarán investigaciones previas, artículos científicos y tesis relacionadas con el diseño y construcción de túneles a escala, así como con simulaciones computacionales. A partir de esta revisión, se identificarán los parámetros clave como resistencia aerodinámica, sustentación y distribución del flujo de aire, consolidando una

base teórica sólida que servirá de sustento para el desarrollo del análisis y la simulación.

Posteriormente, se desarrollará la metodología de análisis y simulación, iniciando con el diseño geométrico y dimensional de un túnel de viento virtual, configurado en software CAD (como SolidWorks o AutoCAD). Este modelo se integrará en herramientas de simulación (ANSYS Fluent o Flow Simulation SolidWorks), donde se definirán las condiciones de frontera, tipo de flujo y parámetros de estudio. El análisis se enfocará en la visualización y evaluación de fenómenos aerodinámicos.

1.4.2. Técnicas

- **Técnica 1:** Se aplicará la técnica de búsqueda bibliográfica, la cual consiste en recopilar y analizar información teórica y técnica relevante sobre los fundamentos de la aerodinámica, el diseño de túneles de viento y metodologías de simulación computacional. Según (Hernández Sampieri, 2014), esta técnica permite construir un marco teórico sólido que oriente el desarrollo del proyecto, identificando conceptos clave y estudios previos aplicables. Se consultarán fuentes confiables como libros especializados, artículos científicos, tesis y documentos técnicos que aborden la clasificación de túneles de viento, el comportamiento del flujo de aire y los parámetros aerodinámicos de interés.
- **Técnica 2:** El Modelado en Software CAD (Diseño Asistido por Computadora) en este apartado esta técnica consiste en la creación de modelos tridimensionales precisos utilizando herramientas de diseño como SolidWorks o AutoCAD. Según (Douvris, 2019), el uso de software CAD permite representar con exactitud las dimensiones y geometría de componentes físicos, facilitando la etapa de simulación y construcción. Se diseñará un modelo virtual del túnel de viento, definiendo sus secciones principales y asegurando que cumpla con los parámetros aerodinámicos necesarios.
- **Técnica 3:** La simulación computacional permite analizar el comportamiento del flujo de aire al interactuar con el túnel diseñado. De acuerdo con Versteeg y Malaasekera (2007), esta técnica utiliza modelos matemáticos y numéricos para resolver las ecuaciones de flujo, evaluando

parámetros como la velocidad, presión y distribución del flujo. El modelo CAD será exportado a SolidWorks para definir condiciones de frontera, propiedades del fluido y mallas computacionales en el proyecto. La simulación permitirá observar la formación de vórtices, la resistencia aerodinámica y la estabilidad del flujo.

Para desarrollar el análisis y simulación del flujo de aire en un túnel de viento utilizando herramientas computacionales como SolidWorks, se inicia con la definición de parámetros y condiciones iniciales del modelo, incluyendo dimensiones del túnel, velocidad del flujo, presión de entrada y salida, y características del material.

1.4.3. Métodos

- **Método Analítico:** Según Hernández Sampeiri (2014), método analítico se centra en descomponer el objeto de estudio en sus componentes esenciales para comprender mejor su funcionamiento del proyecto, este método permite examinar detalladamente el comportamiento del flujo de aire en un túnel de viento. Facilita la comprensión de fenómenos aerodinámicos complejos, como separación del flujo y formación de vórtices, al descomponer las variables del túnel de viento. En la sección de análisis de resultados donde se interpretan las simulaciones y se comparan con valores teóricos, evaluando parámetros clave como número de Reynolds, resistencia aerodinámica y distribución del flujo.
- **El método de Diseño por modelado computacional:** consistió en la construcción de un modelo tridimensional detallado del túnel de viento mediante software CAD especializado (SolidWorks o Autodesk Inventor), definiendo con precisión cámaras de prueba, boquillas de entrada y secciones convergentes-divergentes (Douvris, 2019). Este procedimiento se aplicó en la sección de Metodología, específicamente en la fase de preparación del modelo virtual antes de su análisis numérico, y se escogió por su capacidad para garantizar precisión geométrica, detectar y corregir errores de diseño e ineficiencias estructurales de forma temprana, reducir drásticamente tiempos y costos asociados a prototipos físicos y

proporcionar una base coherente y parametrizada para la posterior simulación de dinámica de fluidos computacional.

- **El método de simulación CFD por volúmenes finitos:** implementado mediante Flow Simulation de SOLIDWORKS, divide el dominio en volúmenes de control que garantizan la conservación local de masa, momentum y energía al resolver las ecuaciones de Navier–Stokes, lo que permite calcular con precisión distribuciones de presión y velocidad en el túnel de viento (Versteeg, 2007). Este procedimiento se empleó en la sección de Metodología al definir las condiciones de contorno, generar la malla de volúmenes finitos sobre el modelo CAD y ejecutar estudios de caso con diferentes velocidades de entrada y rugosidades de superficie. Se eligió por su capacidad de asegurar balances físicos exactos, su integración nativa con el entorno CAD de SolidWorks para iteraciones geométricas rápidas, la eficiencia en la exploración de múltiples diseños y la posibilidad de validar numéricamente los resultados antes de los ensayos experimentales.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. DEFINICIONES

El estudio del flujo de aire en túneles de viento se apoya en los principios fundamentales de la mecánica de fluidos, donde la formulación básica de las ecuaciones de Navier–Stokes describe la conservación de masa y momento en un fluido incompresible y viscoso (Anderson, 2010). En un túnel de baja velocidad, la asunción de incompresibilidad es válida para números de Mach menores a 0,3, lo que permite simplificar la modelación sin perder precisión en la predicción de fuerzas aerodinámicas. La caracterización de la capa límite, elemento esencial en estudios de separación y transición entre flujo laminar y turbulento, se basa en el análisis dimensional introducido por Prandtl y refinado en trabajos posteriores, donde el número de Reynolds (Re) cociente entre fuerzas inerciales y viscosas – determina la similitud dinámica entre el modelo a escala y el prototipo real (Pope, 2000).

El diseño en sistemas aerodinámicos abarca un conjunto de decisiones metodológicas, técnicas y prácticas orientadas a optimizar el comportamiento de los cuerpos expuestos al flujo de aire. En la ingeniería aerodinámica, el diseño se enfoca en reducir las fuerzas de arrastre, mejorar la sustentación y controlar la turbulencia, a fin de lograr eficiencia energética y estabilidad estructural.

Uno de los pilares fundamentales en este proceso es la interacción entre el flujo de aire y las superficies sólidas, la cual genera fuerzas como el arrastre y la sustentación, directamente relacionadas con la geometría del objeto y las condiciones del entorno. La configuración del diseño influye decisivamente en la formación de la capa límite, región del flujo donde los efectos viscosos no pueden ser despreciados (Guachamín Tapuy, 2024).

La simulación en sistemas aerodinámicos es una herramienta esencial que permite modelar, predecir y analizar el comportamiento de flujos de aire sobre estructuras sin necesidad de recurrir inmediatamente a pruebas físicas, lo que contribuye a optimizar recursos y mejorar el entendimiento de fenómenos complejos. Esta metodología puede implementarse mediante técnicas experimentales (como en túneles de viento) y computacionales (mediante CFD, dinámica de fluidos computacional). En contextos educativos y de investigación, la simulación permite recrear condiciones controladas que serían costosas o

inviabiles en situaciones reales, facilitando el estudio de parámetros como la distribución de presiones, velocidades, fuerzas de sustentación y arrastre sobre perfiles aerodinámicos (Valencia Calero, 2024). Por ejemplo, los resultados obtenidos en simulaciones con modelos como el NACA 2415, junto con mediciones físicas, han demostrado su capacidad para validar hipótesis y ajustar diseños sin necesidad de múltiples prototipos físicos.

Túnel de viento

El túnel de viento constituye el núcleo experimental para la caracterización aerodinámica en laboratorio, permitiendo la reproducción controlada de flujos sub-sónicos en régimen laminar y turbulento. Su diseño se basa en criterios de similitud geométrica, cinemática y dinámica para garantizar que los resultados a escala sean extrapolables al prototipo real (Pope, 2000). La sección de contracción, con razones típicas entre 6:1 y 10:1, sirve para acelerar el flujo y homogenizar los perfiles de velocidad, mientras que el difusor restituye la energía pos-prueba y minimiza pérdidas por recirculación. La elección de un túnel de circuito abierto o cerrado implica compensaciones: los primeros son más sencillos y económicos, pero sensibles a perturbaciones ambientales; los segundos ofrecen mayor estabilidad y menor influencia de recirculaciones externas, a costa de un sistema de ventilación más complejo (Pope, 2000).

Por último, el efecto de las paredes del túnel y la rugosidad relativa de las superficies de prueba pueden inducir sesgos significativos en los resultados experimentales. Estudios muestran que el espesor de la capa límite en las paredes, si no se controla adecuadamente, genera gradientes de velocidad transversales que alteran los coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos. Para mitigar estos efectos, se diseñan cámaras de transición y se aplican revestimientos de baja rugosidad en la sección de prueba, junto con la implementación de mallas de flujo secundario para uniformizar el perfil. Estos procedimientos, complementados con corridas de referencia sin modelo, establecen la línea base necesaria para validar tanto las simulaciones CFD como las mediciones de laboratorio.

2.2. ANTECEDENTES

A lo largo de las últimas dos décadas, diversos centros de investigación han integrado de forma intensiva el diseño de prototipos con simulaciones CFD para optimizar y validar sus ensayos en túnel de viento, en la división de ensayos de vehículos aéreos de la NASA Ames, se ha desarrollado un flujo de trabajo “Sketch-to-Solution” que vincula directamente el diseño geométrico asistido por ordenador con la generación automática de mallas y simulaciones CFD previas a las pruebas físicas en el Unitary Plan Wind Tunnel (UPWT). Según Childs et al. (2021), este procedimiento permite ajustar iterativamente la geometría de los modelos de prueba y predecir las características del flujo —presión, coeficientes aerodinámicos y estructuras turbulentas— antes de la configuración experimental, reduciendo hasta un 30 % el tiempo de calibración del túnel NTRS NASA.

Más allá de aplicaciones específicas, la unidad AETC de la NASA ha implementado un programa para proveer a sus usuarios de geometrías “listo-para-CFD” junto con datos de calibración del túnel, facilitando simulaciones in-tunnel paralelas a los ensayos físicos. Este enfoque, descrito por Ross (2023), normaliza las condiciones de contorno y turbulento en los archivos de entrada CFD, de modo que las diferencias entre predicciones y mediciones puedan atribuirse exclusivamente a modelos de turbulencia o errores de mallado, agilizando la identificación y corrección de discrepancias NTRS.

En la TU Delft, el Low-Turbulence Tunnel ha servido de banco de pruebas para validar modelos RANS y LES en flujos de capa límite. Gracias a sensores de alta fidelidad y sistemas PIV sincronizados, investigadores comparan sistemáticamente simulaciones CFD con perfiles de velocidad reales, ajustando parámetros de turbulence modelling. Esta metodología ha permitido desarrollar mallados adaptativos que mejoran la predicción de gradientes de velocidad en muros y vértices de flujo, aportando directrices de diseño para futuras generaciones de túneles de baja turbulencia NTRSAerospace America.

Estos antecedentes ilustran cómo la integración estrecha entre diseño asistido, simulación CFD y ensayos en túnel de viento no solo acelera el desarrollo de prototipos aerodinámicos, sino que también refina los criterios de mallado y los

modelos de turbulencia, pilares esenciales para la fiabilidad y agilidad de los procesos de investigación y desarrollo en aerodinámica.

Los orígenes de la integración entre ensayos en túnel de viento y simulaciones CFD remontan a la década de 1970, cuando Pope y Harper desarrollaron las primeras metodologías de validación numérico–experimental en túneles de baja velocidad, comparando datos de coeficientes de arrastre en perfiles NACA con resultados de discretización RANS incipientes. Durante los años 80, Ferziger y Perić mejoraron estos procedimientos al introducir esquemas de mallado estructurado y técnicas de independencia de malla, estableciendo un protocolo de refinamiento en la capa límite que hoy sigue siendo referencia en estudios de aerodinámica de conductos.

En la década de 1990, el proyecto Phase VI Wind Turbine Blade del NREL en colaboración con la NASA aportó un caso de estudio emblemático: las simulaciones detalladas de flujos separativos en hélices de gran diámetro fueron cotejadas contra mediciones de torque y presiones estáticas, evidenciando la necesidad de mallados locales de alta resolución y la adaptación dinámica de la malla durante el giro. Este trabajo, descrito por (Song, 2014), sentó las bases para los protocolos modernos de “calibración CFD–experimento” en aerogeneradores.

A principios de los 2000, el programa Sketch-to-Solution del NASA Ames Research Center consolidó un flujo de trabajo automatizado que unía el diseño CAD con la generación de mallas y simulaciones CFD previas al ensayo en el Unitary Plan Wind Tunnel. Según (Childs, 2021), esta estrategia permitió reducir en un 30 % los tiempos de puesta a punto del túnel al minimizar iteraciones físicas innecesarias . Paralelamente, en la TU Delft se implementaron comparaciones sistemáticas de modelos RANS, DES y LES en su Low-Turbulence Tunnel, validando nuevos esquemas de turbulencia y mallado adaptativo para flujos de capa límite con niveles de turbulencia menores al 0,1 % .

Más recientemente, (Li, 2023) aplicaron simulaciones LES con mallado dinámico en OpenFOAM a flujos de alta velocidad, demostrando mejoras sustanciales en la predicción de fluctuaciones de presión en ensayos de túnel de viento a escala reducida. Estos proyectos anteceden al estudio planteado y subrayan la

evolución continua de las metodologías de diseño y simulación en el ámbito de túneles de viento.

2.3. TRABAJOS RELACIONADOS

En Europa, destaca el trabajo realizado por Tsolakis (2015) en la Universidad Aristóteles de Salónica, Grecia, donde se llevó a cabo el diseño y construcción de un túnel de viento subsónico de circuito abierto. Este proyecto se centró en el análisis teórico y experimental de un túnel funcional de bajo costo, orientado al uso educativo. El diseño permitió alcanzar flujos estables y consistentes para el estudio de perfiles aerodinámicos, ofreciendo una plataforma eficaz para validar simulaciones por dinámica de fluidos computacional (CFD) y estudiar el comportamiento del flujo alrededor de cuerpos aerodinámicos.

En Estados Unidos, la División de Supercomputación Avanzada de la NASA (NASA Advanced Supercomputing Division) en el Centro de Investigación Ames ha sido pionera en la aplicación de simulaciones numéricas de alta fidelidad para el estudio de flujos hipersónicos. Desde la puesta en marcha del programa NAS (Numerical Aerodynamic Simulator) en 1987, este grupo ha desarrollado modelos multifísicos capaces de reproducir condiciones de Mach 7 a Mach 10, incorporando fenómenos como la interacción choque–capa límite y la ablación térmica de materiales de protección. Mediante el uso de supercomputadoras Cray y modernas técnicas de CFD, los investigadores de Ames realizan estudios paramétricos que abarcan un amplio rango de entalpías y relaciones de presión, lo que permite evaluar virtualmente el comportamiento aerodinámico de prototipos espaciales antes de su ensayo experimental.

En Quito, la Universidad Internacional del Ecuador (UIDE) ha llevado a cabo proyectos como el diseño y construcción de un túnel de viento para ensayos aerodinámicos, destinado a analizar el comportamiento del flujo de aire sobre diferentes cuerpos y validar modelos teóricos mediante pruebas experimentales (Álvarez Ochoa, 2011).

Tras una revisión exhaustiva de la literatura académica y técnica disponible en repositorios institucionales, bases de datos científicas y otras fuentes confiables, no se han encontrado registros de proyectos relacionados con el diseño y simulación de túneles de viento en cantones de la provincia de Manabí distintos a Manta. Si bien existen estudios meteorológicos y oceanográficos sobre el

análisis de vientos en localidades como Jaramijó, Bahía de Caráquez y Manta (Cardín Beseke, 1989), estos no abordan la construcción o uso de túneles de viento. Por lo tanto, hasta la fecha no se han desarrollado proyectos de este tipo en otros cantones de Manabí, lo que resalta la singularidad y relevancia del presente trabajo en el contexto regional

CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA PROPUESTA

Se detalla el proceso técnico y metodológico para el diseño, simulación y validación del sistema experimental propuesto para el análisis aerodinámico en un túnel de viento. Integra herramientas de modelado computacional, diseño asistido por computadora (CAD) y simulación CFD para cumplir los objetivos específicos planteados en la estructura del capítulo.

El capítulo constituye la evidencia documentada del avance desde la concepción teórica hasta la simulación de una solución tecnológica para estudiar fenómenos aerodinámicos de manera cuantitativa en un entorno académico controlado y replicable.

3.1. DESARROLLO

Se ejecuta progresivamente el desarrollo técnico de la propuesta para resolver la problemática identificada en el Capítulo I. Se detalla el proceso de diseño del túnel de viento en entorno virtual, incluyendo el dimensionamiento de sus componentes, la aplicación de software CAD y la configuración de simulaciones computacionales para analizar el comportamiento del flujo de aire. Se describen las etapas del modelado geométrico, la caracterización de condiciones aerodinámicas y la validación de parámetros clave. La presión, la velocidad y la resistencia del sistema se incluyen. Aspectos estructurales, técnicos y funcionales son consideraciones relevantes para la implementación académica del modelo.

3.1.1. Descripción de la propuesta

- **Descripción del Objetivo Específico 1**

El primer objetivo específico consistió en realizar el diseño virtual de un túnel de viento a escala, orientado a aplicaciones didácticas en el ámbito de la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica. Este diseño incluyó la definición geométrica de cada una de sus secciones funcionales: cámara de contracción, zona de estabilización del flujo, sección de pruebas y difusor. Para ello, se utilizaron herramientas de modelado tridimensional, tales como SolidWorks, permitiendo establecer dimensiones proporcionales que aseguren un flujo laminar y controlado dentro del sistema. Además, se consideraron criterios aerodinámicos fundamentales como la relación de contracción, la sección

transversal de entrada y salida, y el comportamiento esperado del flujo en condiciones ideales.

- **Descripción del Objetivo Específico 2**

El segundo objetivo específico consistió en construir físicamente el prototipo a escala del túnel de viento diseñado, utilizando materiales accesibles y técnicas de fabricación didácticas. En esta fase se procedió al montaje de la cámara de contracción, la sección de pruebas y el difusor, empleando acrílico para las paredes transparentes, láminas metálicas para los conductos y soporte estructural de madera contrachapada. Se integró un ventilador axial de velocidad controlada, instalado en la zona de entrada, y se montaron sensores de velocidad (anemómetros de hilo caliente) y de presión estática en puntos estratégicos del túnel. Asimismo, se diseñó y fabricó una rejilla disipadora de turbulencias para asegurar un flujo más uniforme.

- **Descripción del Objetivo Específico 3**

El tercer objetivo específico consistió en analizar y validar los resultados obtenidos mediante el software de simulación, con el fin de evaluar parámetros clave como la resistencia aerodinámica, la sustentación y la distribución del flujo de aire sobre los modelos dispuestos en la sección de pruebas del túnel virtual. Esta etapa implicó la interpretación de datos generados por la herramienta CFD; se compararon visualmente las líneas de corriente, mapas de presión y campos de velocidad, con la finalidad de determinar el desempeño aerodinámico y la eficiencia del túnel como entorno de ensayo. Los resultados fueron analizados a partir de criterios técnicos y teóricos establecidos en la literatura, y permitieron validar que el modelo simulado cumple con los objetivos propuestos para su aplicación didáctica en la formación técnica de los estudiantes de Electromecánica.

3.1.1. Etapas

- **Etapas 1: Actividades realizadas para cumplir Objetivo Específico 1.**

Para cumplir con el primer objetivo específico, se procedió al diseño virtual del túnel de viento, partiendo de la recopilación de fundamentos teóricos sobre el funcionamiento aerodinámico de este tipo de estructuras. Se definieron las secciones principales del túnel: la cámara de contracción, la sección de pruebas

y el difusor, en función de criterios técnicos que garantizan la aceleración y estabilización del flujo de aire.

Se calculó el área de entrada con una relación de contracción de 3:1, basada en velocidades iniciales y deseadas de 3 m/s y 9 m/s, respectivamente. Se estimó un área de entrada de 0,9 m² y un área de prueba de 0,3 m² a partir de este dato, manteniendo proporciones adecuadas para lograr un flujo uniforme y constante. Las dimensiones físicas del túnel se calcularon basándose en una forma rectangular con una base de 0,75 m y una altura de 1,2 m. La longitud total del túnel se definió en 3 m, divididos en tres secciones: 0,75 m para la contracción, 1,5 m para las pruebas y 0,75 m para el difusor. Estos valores se establecieron considerando criterios técnicos, recomendaciones bibliográficas y el espacio disponible para su implementación didáctica futura.

- **Etapla 2: Actividades realizadas para cumplir Objetivo Específico 2.**

Una vez finalizado el diseño tridimensional del túnel de viento, se dio paso a la segunda etapa del proyecto, enfocada en la simulación del flujo de aire mediante el uso del software SolidWorks Flow Simulation. Esta fase tuvo como objetivo visualizar y analizar el comportamiento del aire a través de las diferentes secciones del túnel, evaluando parámetros clave como la velocidad, la presión, las líneas de corriente y la distribución aerodinámica interna. La simulación se configuró estableciendo condiciones de contorno acordes al diseño propuesto: se fijó una velocidad de entrada de 3 m/s y, en la sección de salida, se asumió presión atmosférica estándar, considerando el aire como fluido incompresible a temperatura ambiente, adecuado para estos regímenes de baja velocidad.

Se definió una malla computacional refinada que permitió una resolución adecuada en la zona de pruebas, donde el análisis de velocidad y presión era más crítico. Los resultados permitieron visualizar líneas de corriente continuas, evidenciando un flujo mayormente laminar y bien direccionado.

- **Etapla 3: Actividades realizadas para cumplir Objetivo Específico 3.**

La tercera etapa del proyecto se centró en el análisis e interpretación de los resultados obtenidos a través de la simulación computacional realizada en SolidWorks Flow Simulation. Esta fase tuvo como propósito validar el desempeño aerodinámico del modelo diseñado, evaluando parámetros clave

como la resistencia aerodinámica, la sustentación y la distribución del flujo de aire en la sección de pruebas.

Se partió del procesamiento de los datos generados por el software, los cuales fueron visualizados mediante gráficas vectoriales, curvas de presión y mapas de velocidad. Uno de los principales hallazgos fue la correcta aceleración del flujo en la cámara de contracción y su comportamiento uniforme en la sección de pruebas, lo que sugiere una geometría adecuada del túnel.

También se evidenció una reducción controlada de la velocidad en la sección del difusor, confirmando que el diseño facilita una recuperación eficiente de la presión estática

3.1.1. Presupuesto

Todas las actividades del trabajo de titulación se realizaron utilizando recursos digitales disponibles de forma institucional o gratuita, como el software SolidWorks en su versión educativa y documentación bibliográfica de libre acceso. No se destinó un presupuesto económico específico. El diseño del túnel de viento y las simulaciones se realizaron completamente en un entorno virtual, sin necesidad de fabricar componentes ni adquirir materiales físicos. El desarrollo de los tres objetivos específicos se ejecutó sin inversión monetaria directa, apoyándose exclusivamente en medios informáticos y conocimientos técnicos previamente adquiridos. Por tanto, no se realizó un desglose de costos por objetivos.

3.2. RESULTADOS

3.2.1. Objetivo 1: Logros obtenidos en el objetivo 1.

En concordancia con el primer objetivo específico de este proyecto, se realizó una búsqueda bibliográfica exhaustiva orientada a establecer una base teórica sólida que sustente el desarrollo de la propuesta. Esta revisión incluyó el estudio de los fundamentos de la aerodinámica, principios físicos del flujo de aire, la dinámica de fluidos y su aplicación práctica mediante diseño y operación de túneles de viento.

- **Proceso de funcionamiento del Túnel de viento**

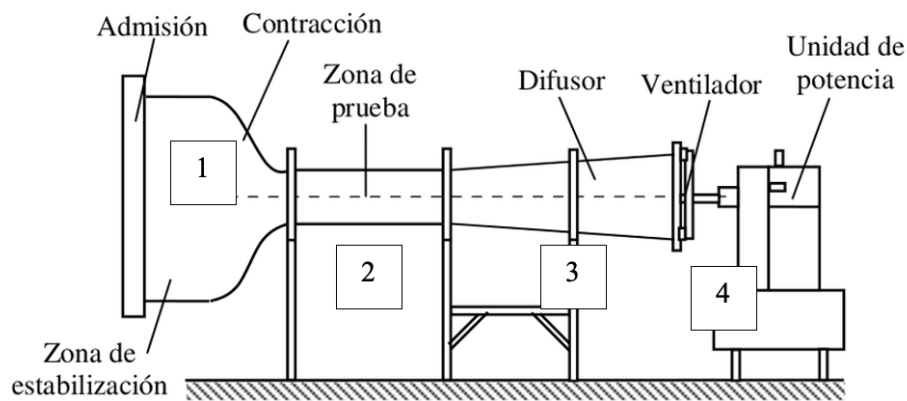
El túnel de viento es un sistema de tipo subsónico y de circuito abierto con varias secciones que generan y controlan el flujo de aire. Los túneles de viento son ampliamente utilizados en entornos académicos y de investigación para analizar

perfiles aerodinámicos, estructuras y vehículos a escala. Se describe el funcionamiento de cada etapa que compone el túnel.

La primera etapa prepara el flujo de aire antes de que llegue al modelo en estudio. Los elementos estabilizadores como mallas o panales de abeja alinean las líneas de corriente y reducen la turbulencia del aire captado desde el ambiente. La sección de contracción disminuye el área de paso para acelerar el flujo de aire hacia la zona de prueba de manera uniforme y direccionada.

Figura 1

Etapas de un túnel de viento



• Propuesta de diseño de túnel de viento

Se definieron las condiciones de referencia para el aire a 225 m snm en El Carmen ($P=99.28$ kPa, $\rho=1.185$ kg/m³, $\mu=1.789 \times 10^{-5}$ kg/(m·s)), lo cual permite fundamentar todos los cálculos de continuidad y dinámica de fluidos. La sección de prueba de $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ (0.36 m^2) implica un diámetro hidráulico de 0.6 m , llevando a un número de Reynolds de aproximadamente 1×10^6 con velocidad de 25 m/s , lo que confirma un flujo turbulento. El caudal volumétrico resultante es de $9 \text{ m}^3/\text{s}$, equivalente a un flujo másico de 10.665 kg/s , y el número de Mach de 0.074 valida la hipótesis de incompresibilidad. Finalmente, la aplicación de Bernoulli muestra que la presión en la sección de prueba cae ligeramente hasta aproximadamente 10010.5 Pa , justificando la selección del ventilador y el diseño del difusor para minimizar pérdidas.

Para mayor detalle de los procedimientos y resultados numéricos, los cálculos completos se encuentran disponibles en los anexos del documento.

Tabla 1

Resumen de cálculos realizados

Descripción	Símbolo	Fórmula	Valor
Presión ambiente	P	—	99.28 kPa
Densidad del aire	ρ	—	1.185 kg/m ³
Viscosidad dinámica	μ	—	1.789×10 ⁻⁵ kg/(m·s)
Área sección prueba	A	A = 0.6 m × 0.6 m	0.36 m ²
Diámetro hidráulico	D _h	D _h = 4 A / P	0.6 m
Número de Reynolds	Re	Re = $\rho \cdot v \cdot D_h / \mu$	1.0×10 ⁶
Caudal volumétrico	Q	Q = A·v	9 m ³ /s
Flujo másico	$\dot{m}$	$\dot{m} = \rho \cdot Q$	10.665 kg/s
Número de Mach	Ma	Ma = v / c	0.074
Presión sección prueba	P ₂	P ₂ = P ₁ + ½· $\rho \cdot (v_1^2 - v_2^2)$	≈ 10010.5 Pa

3.2.2. Resultados del diseño

Una vez obtenidos todos los resultados relacionados con las velocidades, presiones y pérdidas de carga dentro del túnel, se procede a realizar un resumen de los valores correspondientes a las zonas de contracción, sección de pruebas y difusor.

Tabla 2

Medidas del túnel de viento

Componente	Propiedad	Valor
Contracción	Altura de entrada	1000 mm
	Ancho de entrada	1000 mm
	Altura a la salida	400 mm
	Ancho a la salida	400 mm
	Longitud	900 mm
Rejilla direccionadora de flujo	Altura	1000 mm
	Ancho	1000 mm
	Espesor	5 mm
	Área	1 m ²
	Diámetro de agujero	15 mm
Sección de pruebas	Altura	400 mm
	Ancho	400 mm
	Espesor	2 mm
	Área	1 m ²
	Longitud	800 mm
Difusor	Diámetro final	600 mm
	Longitud	1000 mm
	Altura de entrada	400 mm
	Ancho de entrada	400 mm

- ⇒ Presión: 99280 Pa.
- ⇒ Densidad del aire: 1,185 kg/m³
- ⇒ Velocidad de sección de pruebas: 25 m/s

3.2.2. Objetivo 2: Logros obtenidos en el objetivo 2.

- **Diseño estructural asistido por computadora (CAD)**

En función del segundo objetivo planteado se procedió al diseño y modelado computacional del túnel de viento mediante el uso de herramientas de simulación asistida por computadora (CAD), lo cual permite representar de forma precisa las condiciones físicas del flujo de aire a través de las distintas secciones que conforman la estructura experimental.

- **Protocolo de diseño**

Con base en estos parámetros realizados en el objetivo 1, se procedió a modelar cada uno de los componentes del túnel incluyendo la cámara de contracción, la sección de pruebas, el difusor, el sistema de ventilación, estructuras de soporte y dispositivos de medición ajustándolos a las proporciones reales requeridas para garantizar una simulación fiel y un comportamiento aerodinámico estable y controlado. Para el diseño geométrico y estructural del túnel de viento se emplearon herramientas CAD de alta precisión, específicamente el software SolidWorks 2024, el cual permite trabajar en entornos tridimensionales con capacidad para ensamblajes complejos, análisis de interferencias entre componentes y generación automática de planos técnicos. Estas capacidades fueron esenciales para llevar a cabo el desarrollo del modelo físico de manera integral y coherente con los objetivos de simulación aerodinámica.

Figura 2

Diseño de contracción en SolidWorks 2024

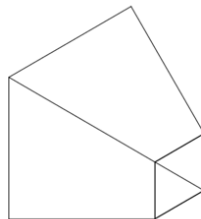


Figura 3

Diseño de la rejilla direccionador de flujo en SolidWorks 2024

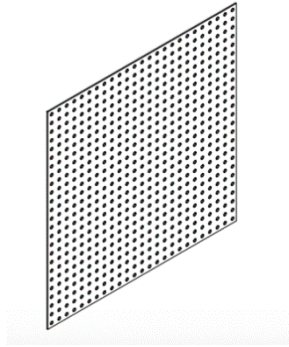
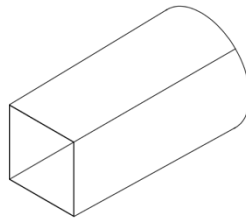


Figura 4

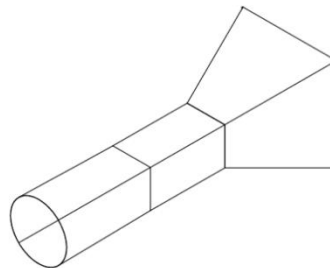
Diseño de difusor en SolidWorks 2024



En la siguiente figura se muestra el detalle completo de la estructura del túnel de viento en el SolidWorks 2024.

Figura 5

Ensamble completo de túnel de viento en solidworks 2024



3.2.3. Objetivo 3: Logros obtenidos en el objetivo 3.

- **Configuración módulo de Flow Simulation**

La simulación computacional del comportamiento del flujo de aire en un túnel de viento se realiza mediante el módulo Flow Simulation del software SolidWorks, una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) que permite modelar y analizar el comportamiento aerodinámico de cuerpos en interacción con flujos externos.

Dentro de la configuración del módulo de flow simulation se debe realizar:

- Delimitar el área de análisis en el ensamble cargado, normalmente se deja un mínimo espacio en el tunel de viento.
- Colocar las condiciones de frontera.
- Realizar la malla para el análisis
- Crear objetivos de análisis (Goals), parámetros como velocidad, presión, temperatura, etc.

3.2.3.1. Configuración condiciones de contorno

Las condiciones de contorno definen cómo el flujo interactúa con los límites del dominio:

- Entrada de flujo (Inlet): Se especifica como un flujo de aire uniforme con una velocidad inicial definida según los objetivos del estudio, nuestro tunel de viento se indico que se tiene una velocidad de 25 m/s.
- Salida de flujo (Outlet): Se configura como una condición de presión ambiental o presión estática cero, lo que permite al software calcular la pérdida de carga y el comportamiento del aire al salir del túnel.
- Paredes (Walls): Las paredes internas del túnel y del modelo físico se configuran como superficies no deslizantes("no-slip"), lo cual implica que la velocidad del fluido en la interfaz con la superficie es cero, permitiendo simular la formación de la capa límite.
- El fluido seleccionado es aire, considerado como un gas compresible a temperatura estándar de laboratorio (20 °C) y con densidad de 1.204 kg/m³.

- **Mallado**

En el contexto de la dinámica de fluidos computacional (CFD), el mallado computacional representa una etapa crítica dentro del proceso de simulación, ya que constituye la base sobre la cual se resuelven numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes que describen el comportamiento del flujo. El mallado consiste en la discretización del dominio continuo ya sea el túnel de viento o el entorno de un modelo físico en una serie de volúmenes finitos o celdas que permiten transformar un problema analítico complejo en un sistema resoluble mediante métodos numéricos.

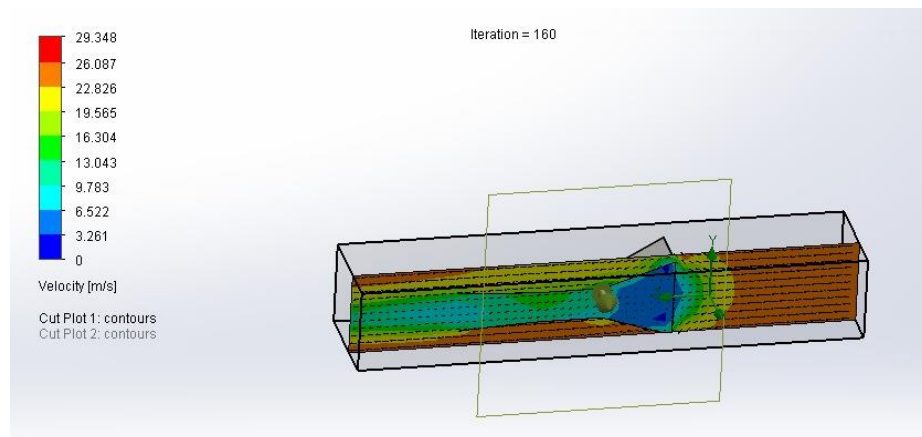
- **Resultados del análisis**

- ⇒ **Velocidad del túnel de viento plano yz**

En SolidWorks Flow Simulation, la figura 6 muestra variaciones significativas en la magnitud de la velocidad en un túnel de viento. La escala de colores muestra valores de velocidad de 0 m/s a 29.35 m/s. Se observa una zona de flujo acelerado con velocidades que superan los 26 m/s en la región anterior al objeto. La velocidad cae drásticamente por debajo de los 6 m/s en la región inmediatamente posterior al cuerpo, generando una clara área de recirculación. La resistencia aerodinámica significativa es causada por la fuerte interacción entre el flujo y la geometría del objeto. Dentro del túnel se revela la distribución no uniforme del flujo a través de la transición de colores. Indicando una desaceleración progresiva del aire, predominan los tonos verdes y celestes alrededor del cuerpo, con velocidades de 9 a 16 m/s. La alta concentración de líneas de corriente en la parte frontal señala una zona de acumulación de presión, mientras que la dispersión en la parte trasera confirma la pérdida de energía cinética del fluido.

Figura 6

Velocidad en el tunel de viento plano yz



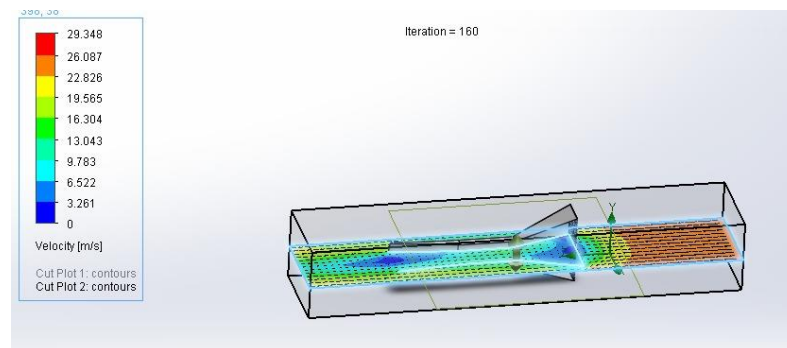
- ⇒ **Velocidad del túnel de viento plano xy**

La figura 7 muestra la simulación del flujo de aire con un cuerpo insertado en la sección media de un túnel de viento. Se observa un corte transversal con líneas de corriente y contornos de velocidad codificados por colores. La velocidad máxima observada en el flujo es de 29.35 m/s.

El flujo se aproxima al objeto central en el túnel, disminuyendo progresivamente su velocidad. En el entorno inmediato del cuerpo predominan velocidades por debajo de los 9.78 m/s con tonos azules y verdes. Una resistencia aerodinámica importante se genera por la formación de una zona de alta presión y una posible acumulación de flujo en la parte frontal del objeto. Se observa además una reorganización del perfil aerodinámico con zonas de recirculación y aceleración al pasar el flujo por el cuerpo. Después del estrechamiento del túnel, el flujo se acelera abruptamente, alcanzando velocidades cercanas a 26–29 m/s debido al efecto Venturi por la reducción de sección. La aceleración repentina favorece el desarrollo de la capa límite y la generación de gradientes importantes en el perfil del flujo debido al descenso de presión en esa zona.

Figura 7

Túnel de viento plano xy



⇒ **Presión del túnel de viento plano yz**

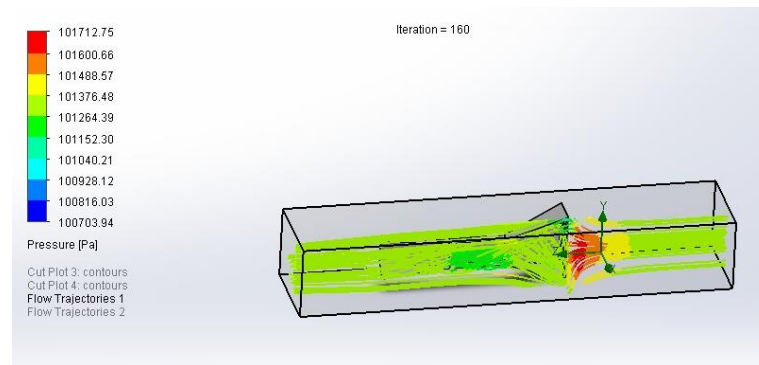
En el túnel de viento simulado, se visualizan contornos de presión estática y trayectorias de flujo en la figura 8. La interacción del aire con la geometría interna se observa. En el dominio del túnel, los valores de presión varían entre 100703.94 Pa y 101712.75 Pa. Una variación de aproximadamente 1000 Pa se indica.

En el centro del túnel, el flujo impacta directamente contra el objeto en una clara zona de alta presión (color rojo intenso). La energía cinética del flujo se convierte en energía de presión en una zona de estancamiento, lo que causa una acumulación de presión. Los valores máximos alcanzan aproximadamente 101712 Pa en esta región, generando un efecto significativo de resistencia aerodinámica debido al aumento de presión estática ambiente. En la región posterior, la presión desciende hasta 100703 Pa a medida que el

flujo se desvía alrededor del cuerpo y atraviesa la zona convergente del túnel. En la simulación de velocidad, se evidenció que la formación de una estela turbulenta se asocia con una aceleración del flujo y una caída de presión. La generación de vórtices y pérdida de eficiencia aerodinámica pueden ocurrir debido a la reorganización y separación del flujo. Este fenómeno se muestra en las trayectorias de flujo.

Figura 8

Presión plano yz



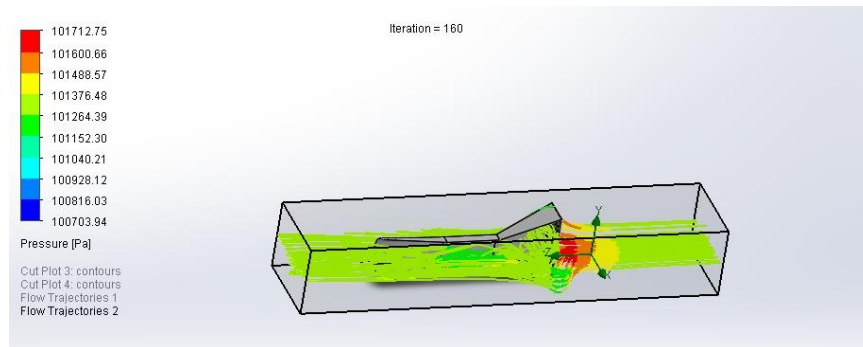
⇒ **Presión del túnel de viento plano xy**

La figura 9 muestra la distribución de presión estática en un túnel de viento con un cuerpo en el canal central, simulado mediante CFD. El gradiente de presión significativo a lo largo del dominio se evidencia por la escala de presión que va desde 100703.94 Pa hasta 101712.75 Pa.

En la parte anterior del modelo, el flujo es constante y sin interferencias, con una presión uniforme de alrededor de 101040–101150 Pa. Se identifica una zona de alta presión justo en la parte frontal del cuerpo al acercarse al objeto central, generada por el impacto del flujo y la consecuente desaceleración. Alcanza hasta 101712 Pa. En la zona de estancamiento, la energía cinética del aire se convierte parcialmente en presión estática, lo que es un fenómeno característico. El flujo es obligado a bordear la geometría, lo que causa una disminución abrupta de la presión, mostrando tonos verde claro y azul que representan presiones tan bajas como 100816 Pa o menos. La aceleración del flujo se confirma por la caída de presión debido al efecto Venturi en el canal construido, junto con posibles zonas de baja presión y recirculación en la estela del objeto.

Figura 9

Presión túnel de viento plano xy



- **Interpretación de los resultados**

El módulo de Flow Simulation en SolidWorks muestra la distribución de velocidad y presión del flujo de aire en el túnel de viento. Se alcanzan valores máximos de aproximadamente 29,35 m/s en las zonas de mayor restricción, donde el fluido se acelera significativamente; mientras que en la región frontal del modelo insertado, las velocidades caen por debajo de 6 m/s, indicando una zona de estancamiento y la formación de estela turbulenta .

En cuanto al campo de presión, se evidencia una zona de alta presión de hasta 101 712 Pa en la parte frontal del objeto, producto del impacto del flujo y la consecuente desaceleración; posteriormente, la presión desciende hasta cerca de 100 703 Pa en la estela trasera, confirmando la recuperación de velocidad por efecto Venturi y la existencia de un diferencial de presión significativo que justifica la generación de vórtices en zonas de baja presión .

En conjunto, estos resultados validan que las dimensiones, la geometría interna del túnel y las condiciones de contorno fueron definidas correctamente, pues el comportamiento observado de la velocidad y presión concuerda con los principios teóricos de la aerodinámica subsónica en túneles de viento de circuito cerrado.

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- La base teórica y bibliográfica estableció fundamentos sólidos sobre aerodinámica y simulación computacional, permitiendo identificar los parámetros críticos a evaluar como la resistencia aerodinámica, la sustentación y la distribución del flujo. Esta información ayudó de forma precisa el diseño estructural del túnel de viento, dividido en secciones funcionales: cámara de estabilización, contracción, zona de pruebas y difusor, conforme a estándares internacionales. El túnel fue concebido como un sistema subsónico de circuito cerrado, lo cual optimiza el control del flujo y reduce las pérdidas energéticas.
- La simulación computacional en SolidWorks Flow Simulation permitió validar con precisión el comportamiento del flujo de aire en el túnel, confirmando su viabilidad funcional. En los análisis de velocidad, se observó una aceleración del flujo desde valores iniciales de 0 m/s hasta un máximo de 29.35 m/s en la zona de mayor contracción, mientras que en la zona posterior al cuerpo colocado en el túnel, la velocidad disminuyó hasta 6 m/s, evidenciando claramente la formación de una estela turbulenta. En cuanto al análisis de presión, se registró una acumulación de presión estática en la parte frontal del objeto con valores de hasta 101712.75 Pa, frente a una caída posterior a 100703.94 Pa, lo que confirma la existencia de un diferencial de presión significativo.
- Se logró un diseño óptimo del túnel de viento que cumple con los requisitos funcionales y académicos establecidos, al permitir la observación detallada de fenómenos aerodinámicos bajo condiciones controladas. La correcta definición del dominio de simulación, la generación de un mallado refinado en zonas críticas, y la implementación de condiciones de contorno precisas, permitieron obtener resultados estables, sin errores de convergencia y con alta fidelidad respecto a los principios físicos esperados.

4.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar este diseño virtual en un modelo físico a escala, con el fin de realizar pruebas experimentales que permitan contrastar los resultados simulados y fortalecer el aprendizaje práctico de los estudiantes mediante la integración de sensores y sistemas de adquisición de datos.
- Es aconsejable extender este estudio a diferentes geometrías de perfiles aerodinámicos y condiciones de entrada del flujo, lo que permitiría optimizar el diseño del túnel y ampliar su aplicabilidad como herramienta de validación para proyectos de investigación en otras ramas de la ingeniería, como automotriz, aeronáutica y energías renovables.

BIBLIOGRAFÍA

- Versteeg, H. K. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method (2ª ed.)*. Harlow, Inglaterra. Pearson Education Ltd.
- Yépez Andagana, L. A. (2023). *Propuesta de implementación de túneles de viento de bajo costo con validación CFD para instituciones técnicas superiores del Ecuador*. . Universidad Politécnica Salesiana.
- Ferziger, J. H. (2020). *Computational Methods for Fluid Dynamics (3.ª ed.)*. . Springer.
- Barlow, J. B. (1999). *Low-Speed Wind Tunnel Testing (3ª ed.)*. . John Wiley & Sons.
- Álvarez Ochoa, J. P. (2011). *Diseño y construcción de un túnel de viento para ensayos aerodinámicos*. . Universidad Internacional del Ecuador. .
- Anderson, J. D. (2010). *Fundamentals of aerodynamics (5th ed.)*. . McGraw-Hill Education.
- NASA. (2023). CFD-based calibration methodologies for wind tunnel testing. *National Aeronautics and Space Administration*., 2023-210345.
- Li, J. &. (2023). Adaptive mesh LES of high-Reynolds-number wind tunnel flows using OpenFOAM. . *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 236, 105258.
- García, L. M. (2024). Comparative study of RANS, DES and PANS turbulence models for thin-plate boundary-layer flows in wind tunnel simulations. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 38(1), 45–60.
- Hernández Sampieri, R. F. (2014). *Metodología de la investigación (6ª ed.)*. . McGraw-Hill.
- Douvris, A. Z.-S. (2019). Mechanisms for hemodynamic instability related to renal replacement therapy: a narrative review. *Intensive Care Medicine*.
- Song, X. &. (2014). CFD simulation of Phase VI wind turbine blade aerodynamics and validation with wind tunnel data. . *Renewable Energy*(68), 87–98.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.012>.
- Childs, D. W. (2021). The NASA Ames “Sketch-to-Solution” workflow for rapid wind tunnel model preparation. . *AIAA Journal*., 59((4)), 1234–1247.
<https://doi.org/10.2514/1.J0591234>.
- Li, J. &. (2023). Adaptive mesh LES of high-Reynolds-number wind tunnel flows using OpenFOAM. . *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*(236), 105258. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105258>.

ANEXOS

Anexo 1. Cálculos físico del túnel de viento

Para los cálculos, es necesario conocer las propiedades termodinámicas de la zona en la que se utiliza el túnel para el cual se determinará que dicho túnel podría trabajar en la ciudad de El Carmen que se encuentra ubicada a 225 msnm.

- Velocidad (v)= 25 m/s = 90 km/h
- Altura (a)= 600 mm
- Ancho (b)= 600 mm
- Sección rectangular = 0.36 m²

En la tabla se muestra los valores termodinámicos a altura en la que está la ciudad de El Carmen – Manabí.

Tabla 3

Datos termodinámicos en el Carmen - Manabí

Altura [msnm]	Presión [kPa]	Densidad [kg/m ³]	Velocidad del sonido [m/s]	Viscosidad dinámica [kg/(m·s)]
225	99.28	1.185	340.1	1.789×10^{-5}

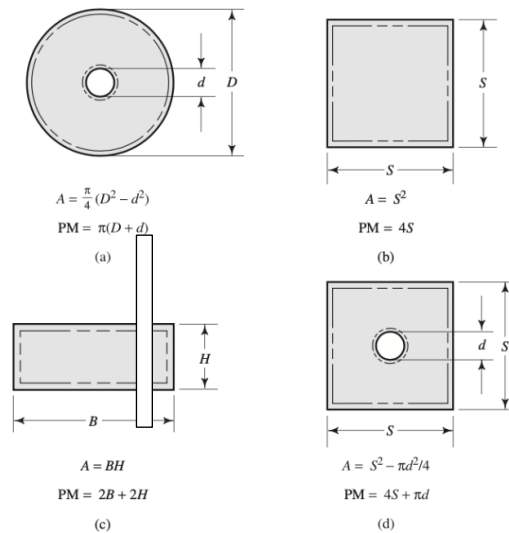
Estos datos son la base para todos los cálculos, debido a que no es lo mismo diseñar para una ciudad que se encuentra a 0 msnm y una que se encuentra a 225 msnm, esta altura hace que los demás datos varíen y como resultado final los datos no podrían ser favorables para el túnel si este llegara a trabajar en un lugar para el que no fue diseñado.

Determinación del tipo de flujo

Para determinar el tipo de flujo hay que considerar previamente cálculo de secciones y perímetros, para ello se tiene lo siguiente:

Figura 10

Cálculo de secciones transversales y perímetro mojado



Fuente: (Mott, 2006)

Al realizar el cálculo para una sección cuadrada:

$$A = S^2$$

$$A = (0,6 \times 0,6)^2$$

$$A = 0,36m^2$$

Esta será el área por donde se hará circular el aire con la velocidad necesaria pruebas.

Cálculo del perímetro mojado:

$$PM = 4S$$

$$PM = 4 \times (0,6m)$$

$$PM = 2,4m$$

Cálculo de diámetro hidráulico:

$$D_h = \frac{4A}{PM}$$

$$D_h = \frac{4 \times (0,36)}{2,4}$$

$$D_h = 0,6m$$

Con este dato se puede calcular el número de Reynolds:

$$N_{Re} = \frac{v D_h \rho}{\mu}$$

$$N_{Re} = \frac{\frac{25m}{s} \times 1.185 \frac{Kg}{m^3}}{1.789 \times 10^{-5} \frac{Kg}{ms}}$$

$$N_{Re} = 529992,12$$

El número de Reynolds para la sección de pruebas es $\sqrt{529992,12}$ y con este valor se determina el flujo que se va a tener dentro de la cámara de pruebas.

- **Determinación del caudal**

A continuación se determina el caudal, parámetro importante para determinar el tipo de ventilador a utilizar, también se determinan las velocidades en cada sección y otros datos como las pérdidas y presiones.

$$Q = v \times A$$

$$Q = 25m/s \times 0,36m^2$$

$$Q = 9 \frac{m^3}{s}$$

Se obtiene así el caudal de aire requerido en la sección de pruebas para alcanzar la velocidad máxima prevista. Además, es necesario calcular el flujo másico, ya que este valor permitirá aplicar la ecuación de continuidad entre las distintas secciones del túnel. En conjunto con la ecuación de Bernoulli, estos principios permiten determinar las velocidades y presiones presentes a lo largo del sistema.

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

$$\dot{m} = 1.185 \frac{Kg}{m^3} \times 9 \frac{m^3}{s}$$

$$\dot{m} = 10,66 \frac{Kg}{s}$$

Mediante este análisis dimensional es posible estimar las pérdidas de presión que ocurren en las distintas secciones del túnel de viento. Estas pérdidas se determinan utilizando coeficientes extraídos de tablas o gráficos, los cuales se seleccionan en función de la geometría y longitud de los tramos de sección constante del túnel.

- **Determinación de la sección de contracción**

La sección de contracción del túnel de viento cumple funciones clave, como estabilizar el flujo de aire entrante y aumentar su velocidad antes de ingresar a la cámara de pruebas. Esta parte, que funciona como una tobera, eleva la velocidad del flujo respecto a la entrada mientras reduce la presión en el mismo punto. Este cambio de presión puede generar variaciones en la densidad del aire, fenómeno característico de los flujos compresibles, lo que exige calcular dicha densidad para aplicar correctamente la ecuación de Bernoulli.

Sin embargo, si las variaciones de presión no son significativas, se puede considerar que la densidad permanece constante, asumiendo un flujo incompresible. Para comprobar esta condición, es necesario calcular el número

de Mach utilizando la ecuación correspondiente; si el resultado es inferior a 0,3, se acepta que el aire puede tratarse como incompresible en todo el túnel, permitiendo simplificar los cálculos bajo esta premisa.

Número de Mach:

$$M = v/vs$$

Donde:

$M \Rightarrow$ Número de Mach

$v \Rightarrow$ Velocidad propuesta en la sección de pruebas

$vs \Rightarrow$ Velocidad del sonido

Realizando el cálculo se tiene:

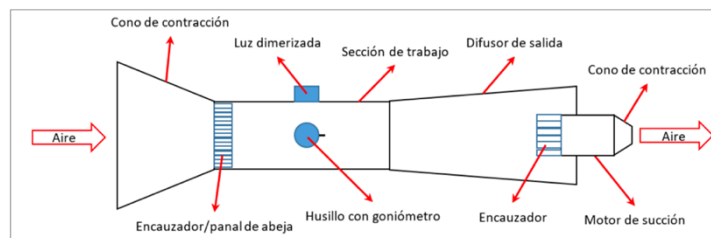
$$M = (25m/s) / \left(\frac{339.9m}{s} \right)$$

$$M = 0,074 < 0,3 \text{ Flujo incompresible}$$

Para efectuar los cálculos correspondientes a la sección de contracción, se definen inicialmente las dimensiones de entrada, a partir de las cuales se determinan las demás variables necesarias.

Figura 11

Túnel de viento – Cono de contracción



Fuente: (Salomone, 2024)

$\Rightarrow$ Velocidad de salida $v_2 \Rightarrow 25 \text{ m/s}$

$\Rightarrow$ Área de entrada $A_1 \Rightarrow 1 \text{ m}^2$

$\Rightarrow$ Área de salida $A_2 \Rightarrow 0,36 \text{ m}^2$

$\Rightarrow$ Densidad $\rho \Rightarrow 1,185 \text{ kg/m}^3$

$\Rightarrow$ Presión atmosférica $P_1 \Rightarrow 10020 \text{ [Pa]}$

Con estos datos se puede calcular la velocidad 1:

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2$$

$$V_1 = (25m/s \cdot 0,36m^2) / 1m^2$$

$$V_1 = 9m/s$$

- **Cálculo de presiones de contracción**

Esto se realiza a partir de la ecuación de Bernoulli:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \gamma z_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \gamma z_2$$

Considerar que al momento de calcular las alturas $z_1 = z_2$ por estar al mismo nivel.

$$100200 Pa + \frac{1}{2} \left(1,185 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(\frac{9\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = P_2 + \frac{1}{2} \left(1,185 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(\frac{25\text{m}}{\text{s}} \right)^2$$

$$P_2 = 100190,52 Pa$$

Teniendo una variación de presiones:

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

$$\Delta P = 100200 - 100190,52$$

$$\Delta P = 9,48 Pa$$

Se evidencia que la presión P_2 presenta una disminución, registrándose una diferencia de 9,48 Pa respecto a la presión inicial. Este comportamiento valida la teoría que establece que al reducir el área transversal del flujo, la velocidad aumenta mientras que la presión disminuye.

Difusor

Esta sección permite expulsar el aire de manera controlada al disminuir progresivamente su velocidad al salir del túnel. Se emplea una sección de expansión para reducir la velocidad del flujo y evitar turbulencias, asegurando un flujo uniforme en el túnel y minimizando pérdidas.

Las tablas obtenidas experimentalmente se utilizan para dimensionar el difusor y otros componentes similares. El ángulo de apertura del difusor se calcula en función de la relación entre el área de salida y el área de entrada, que es equivalente al área de salida de la sección de pruebas. Es necesario para este proceso. Se establece el coeficiente de pérdida a partir de la relación de áreas para calcular la pérdida total de carga en el sistema.

Relación de áreas:

$$AR = A_1/A_2$$

donde:

$A_2 \Rightarrow$ Área de salida del difusor (m)

$A_1 \Rightarrow$ Área de entrada del difusor (m)

Se conoce el A1 y es necesario imponer un A2 que después será modificado cuando se tenga el dato exacto del diámetro del ventilador conveniente para el diseño.

Con un área 1 de 0,36m² conocidas y un radio impuesto de 250 mm tenemos un área 2 de 0,4m² donde continúa como:

$$AR = 0,4/0,36$$

$$AR = 1,11$$

Planos generales SolidWorks 2024

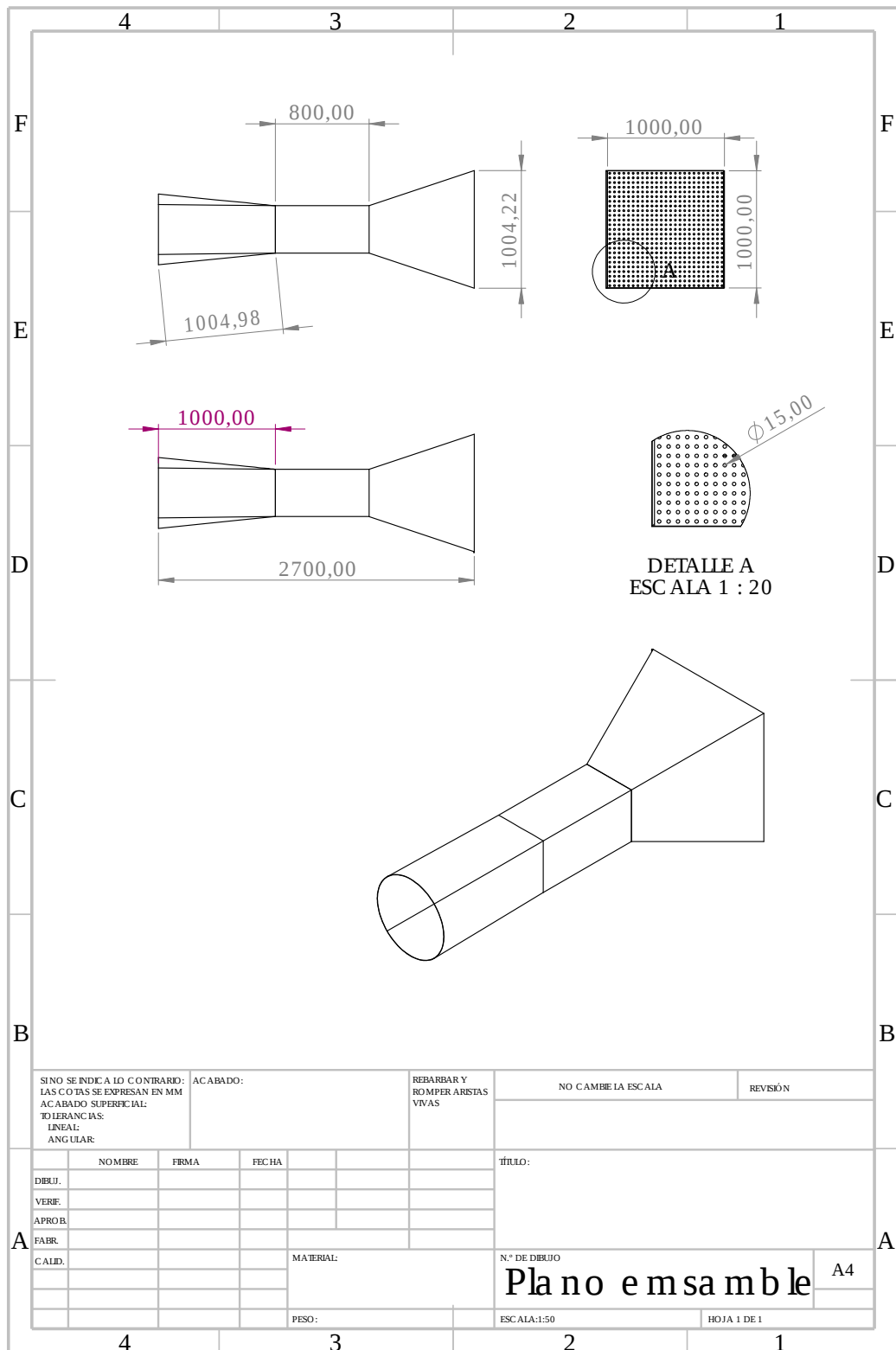
N.º DE DIBUJO

Contra c c i o n p l a n o^{A4}

4	3	2	1
F			F
E			E
D			D
C			C
B			B
A			A
4	3	2	1

DETALLE A

SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
DIBUJ.		NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:	
VERIF.									
APROB.									
FABR.									
CALID.									
				MATERIAL:		N.º DE DIBUJO		Ma lla p l a n o A4	
				PESO:		ESCALA:1:10			



Daniel Cevallos - Steven Fajardo

3%
Textos
sospechosos

- < 1% Similitudes
entre las fuentes mencionadas
- 2% Idiomas no reconocidos
- 42% Textos potencialmente generados por la IA (ignorado)

Nombre del documento: Daniel Cevallos - Steven Fajardo.docx
ID del documento: a34239ad3419da45d69177a8fa93f7509cc48c7d
Tamaño del documento original: 721,94 kB

Depositante: RENE FERNANDO LOPEZ BARBERAN
Fecha de depósito: 19/8/2025
Tipo de carga: Interface
fecha de fin de análisis: 19/8/2025

Número de palabras: 8374
Número de caracteres: 56.425

Ubicación de las similitudes en el documento:

Fuentes con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	 repositorio.uide.edu.ec Repositorio Digital UIDE: Diseño y construcción de un L... https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37100/4398	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (23 palabras)
2	 idus.us.es Diseño y construcción de un túnel de viento para ensayos en régime... https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/48841	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (21 palabras)
3	 EM-2025-1-07.docx EM-2025-1-07 #f5e5af Viene de de mi grupo	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (14 palabras)
4	 Documento de otro usuario #931c1b Viene de de otro grupo	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (12 palabras)
5	 Documento de otro usuario #f1a84f Viene de de otro grupo	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (11 palabras)

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas)

 Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

-  <https://doi.org/10.2514/1.10591234>
-  <https://doi.org/10.1016/f.jjweia.2023.105258>
-  <https://doi.org/10.1016/f.j.renene.2014.01.012>

