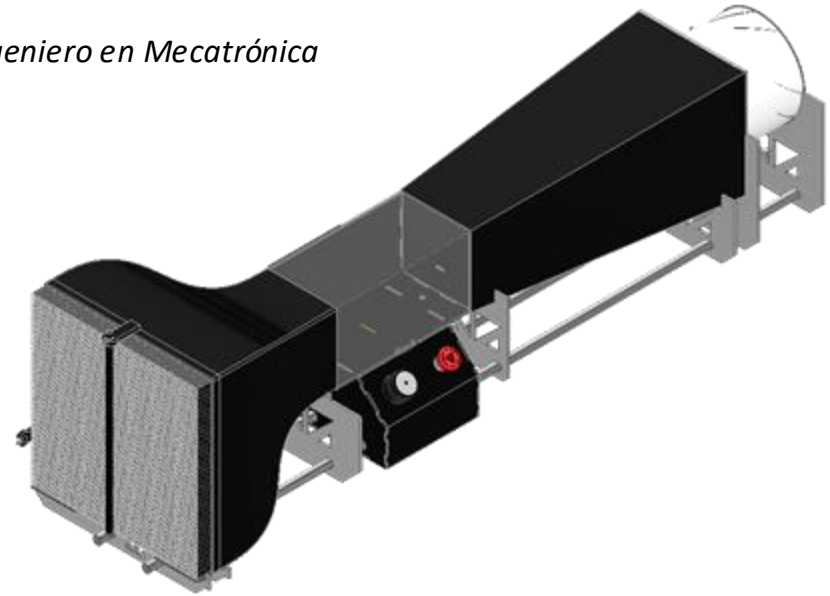
Diseño, construcción y validación numérica de un túnel de viento a escala para aplicaciones académicas

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

Autores: Chacha Chacha, Kevin Alejandro
Gonzalez Yepes, Eliel David

Director: Ing. Héctor Calvopiña, Msc.



Sangolquí, 04 de agosto de 2026

CONTENIDO

01 **Capítulo I - Generalidades**
Antecedentes, justificación, problema, alcance limitaciones y objetivos

02 **Capítulo II - Estado del arte**
Principios de aerodinámica y tipos de túneles de viento

03 **Capítulo III - Metodología**
Diseño mecánico, instrumentación y simulación CFD

04 **Capítulo IV - Resultados**
Pruebas experimentales, CFD y discusión de resultados

05 **Capítulo V**
Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

Antecedentes

Antecedentes
Justificación
Problemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

Los túneles de viento han sido la herramienta clave para el estudio experimental de la aerodinámica.

1746	1871	1908–1909	1922	Hoy
Benjamin Robins	**Francis Wenham**	**Prandtl / Eiffel**	**Max Munk**	**NASA Ames y academia**
Brazo rotatorio para medir resistencia del aire	Primer túnel de viento (conducto cerrado)	Modelos de circuito cerrado y abierto	Túnel de densidad variable (VDT)	Túneles industriales y educativos a escala

Contexto ESPE: El Laboratorio de Fluidos cuenta con un túnel de circuito abierto con instrumentación limitada. El Laboratorio de Mecanismos y Simulación no dispone de un túnel de viento para reforzar la enseñanza de la asignatura Ingeniería Asistida por Computador.

Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

Justificación e importancia

1 Herramienta experimental clave

El túnel de viento permite examinar de forma controlada el comportamiento de objetos frente a flujos de aire.

2 Complemento del CFD

El prototipo físico valida los modelos matemáticos de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

3 Valor educativo y tecnológico

Favorece la comprensión práctica de la mecánica de fluidos y reduce la necesidad de equipos costosos.

4 Aporte al laboratorio ESPE

Dota al Laboratorio de Mecanismos y Simulación de un prototipo funcional para reforzar la simulación CFD en Mecatrónica, Mecánica y afines.

Planteamiento del problema

Antecedentes
Justificación
Prroblema
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

Situación actual

- El Laboratorio de Mecanismos y Simulación de la ESPE no cuenta con un túnel de viento.
- Los experimentos de aerodinámica se realizan únicamente mediante simulación CFD (ANSYS estudiantil), sin contraste físico.
- Otros laboratorios requieren modernización: falta de sistemas de control/electrónica y de visualización del flujo.

Necesidad

Construir un túnel de viento subsónico de baja velocidad, asequible y orientado a fines académicos, que: asegure flujo homogéneo, integre instrumentación, permita visualizer líneas de flujo y tenga validación CFD

Antecedentes
Justificación
Prroblema
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

Alcance

Diseño y construcción del prototipo

Lugar del prototipo

El diseño se realiza a partir del lugar donde se va a colocar el túnel de viento.

→

Modelos a escala 1:24 y 1:34

Sus medidas se usan como referencia base para definir el tamaño de la zona de prueba.

→

Cono, difusor y demás elementos

Se diseñan a partir de esas medidas, buscando un flujo uniforme y laminar en la zona de prueba.

Construcción del prototipo físico

Selección adecuada de materiales, uniones entre los distintos componentes e implementación de sensores para la velocidad en la zona de prueba.

Alcance

Validación mediante CFD

Antecedentes
Justificación
Prroblema
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

Comparación cualitativa

Líneas de flujo mediante humo, entre el prototipo y la simulación.

Comparación cuantitativa

Velocidad en la zona de pruebas, entre el prototipo y la simulación.

Ubicación del proyecto

El proyecto se desarrolla para su ubicación y adecuación dentro del Laboratorio de Mecanismos y Simulación Numérica, considerando un tamaño reducido y su aplicación académica.

Limitaciones del proyecto

Antecedentes
Justificación
Prroblema
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

Finalidad académica

No se contemplan ensayos aerodinámicos industriales o para distribución comercial.

Régimen subsónico

Funcionamiento únicamente para baja velocidad, con flujo incompresible entre 0 y 9 m/s.

Tamaño del laboratorio

El tamaño del túnel debe corresponder al espacio donde se ubicará, condicionando el diseño.

Modelos elegidos

El estudio se enfoca en los modelos elegidos; no se garantiza un funcionamiento adecuado para modelos externos.

Fuera de alcance

No se contemplan análisis de ruido, eficiencia energética ni vibraciones; hay limitaciones de tolerancias de fabricación, alineación, sellado y acabados.

Precisión de sensores

La validación de la instrumentación está sujeta a errores de precisión y calibración de los sensores utilizados.

Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

Objetivo general

Diseñar, construir e instrumentar un túnel de viento de circuito abierto de baja velocidad, y caracterizar su desempeño mediante simulación numérica y pruebas experimentales, con el fin de analizar el comportamiento aerodinámico de modelos a escala en aplicaciones académicas.

Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

Objetivos específicos

1. Realizar una revisión bibliográfica sobre principios de aerodinámica y diseño de túneles de viento, con el fin de establecer los fundamentos teóricos y los criterios técnicos necesarios para el desarrollo del proyecto.
2. Desarrollar el diseño conceptual y geométrico del túnel de viento, estableciendo sus componentes principales y parámetros de operación, mediante herramientas de modelado CAD y simulación CFD.
3. Construir el prototipo físico del túnel de viento mediante selección de materiales accesibles para obtener una correcta integración de los elementos del túnel de viento.
4. Implementación del sistema de instrumentación y adquisición de datos de la velocidad dentro de la zona de pruebas con el fin de caracterizar el prototipo.
5. Realizar la validación experimental del túnel de viento mediante pruebas en los modelos de prueba seleccionados, analizando el comportamiento del flujo y comparando resultados con la simulación CFD por medio de Ansys Fluent.

Principios de aerodinámica

Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

Re Número de Reynolds

Parámetro adimensional que relaciona las fuerzas inerciales y viscosas de un fluido, permitiendo identificar el régimen de flujo.

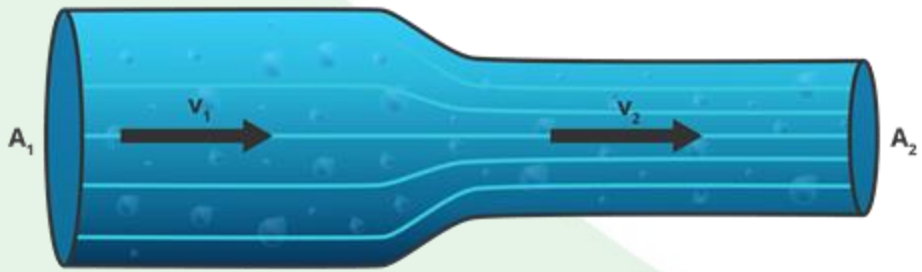
A point B point

$$P + \frac{1}{2}pV^2 + pgh = P + \frac{1}{2}pV^2 + pgh$$

Pressure energy · Kinetic energy · Potential energy

Q Ecuación de continuidad

Principio de conservación de la masa que indica que el flujo másico se mantiene constante a lo largo de un conducto.



B Principio de Bernoulli

Establece que, en un flujo ideal, la suma de las energías de presión, cinética y potencial permanece constante.

Ma Número de Mach

Parámetro adimensional que expresa la relación entre la velocidad de un objeto o flujo y la velocidad del sonido en el medio.

Principios de aerodinámica

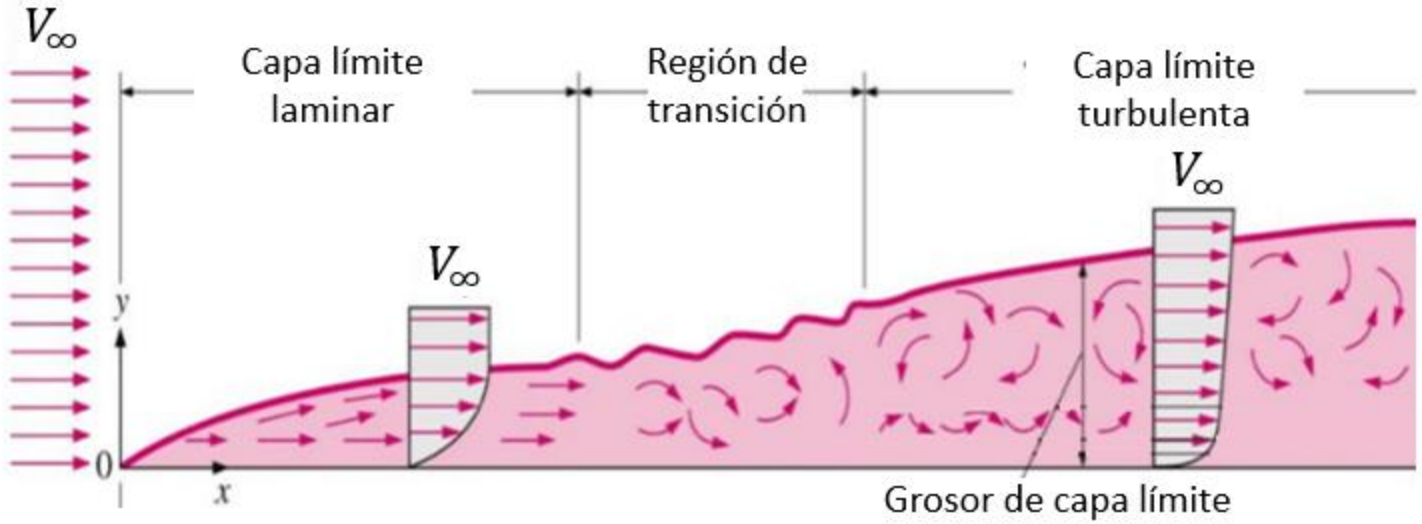
Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

Capa límite

Región delgada cerca de la superficie donde dominan los efectos viscosos; su desprendimiento explica la pérdida de sustentación y el aumento de arrastre en los modelos de prueba.

Ley de similitud

La ley de similitud establece las condiciones necesarias para que un modelo a escala represente adecuadamente el comportamiento de un prototipo real, manteniendo equivalencia en la geometría, el movimiento y las fuerzas que intervienen en el fenómeno estudiado..



Tipos y clasificación de túneles de viento

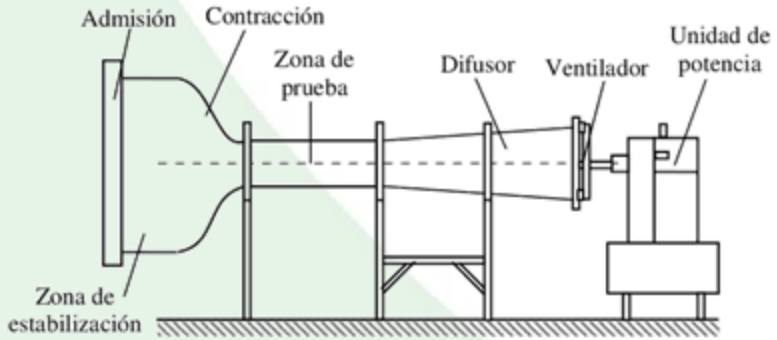
Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

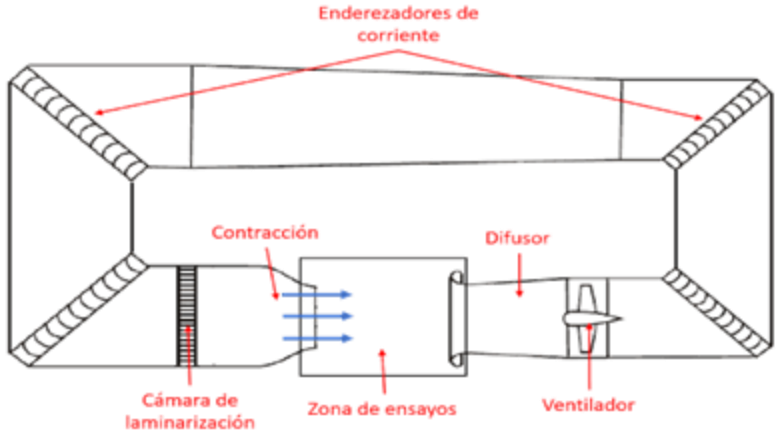
Circuito abierto (Eiffel)

- Aire extraído del entorno, sin recirculación
- Menor inversión y espacio requerido
- Más frecuente en laboratorios educativos
- Facilita experimentos con humo visible
- **Elegido para este prototipo**

Circuito cerrado (Prandtl/Göttingen)

- Aire recircula en conducto sellado
- Mayor eficiencia energética
- Costo de construcción más elevado
- Preferido en investigaciones de alta precisión





Clasificación adicional: por sección (abierta/cerrada) · por dirección de flujo (horizontal/vertical) · por velocidad (baja, subsónico, transónico, supersónico, hipersónico — según Ma)

Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

Metodología general



Revisión bibliográfica

Diseño (mecánico/electrónico/HMI)

Simulación CFD

Construcción e implementación

Caracterización experimental

Validación

Resultados

Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

Zona de pruebas

Criterios de diseño

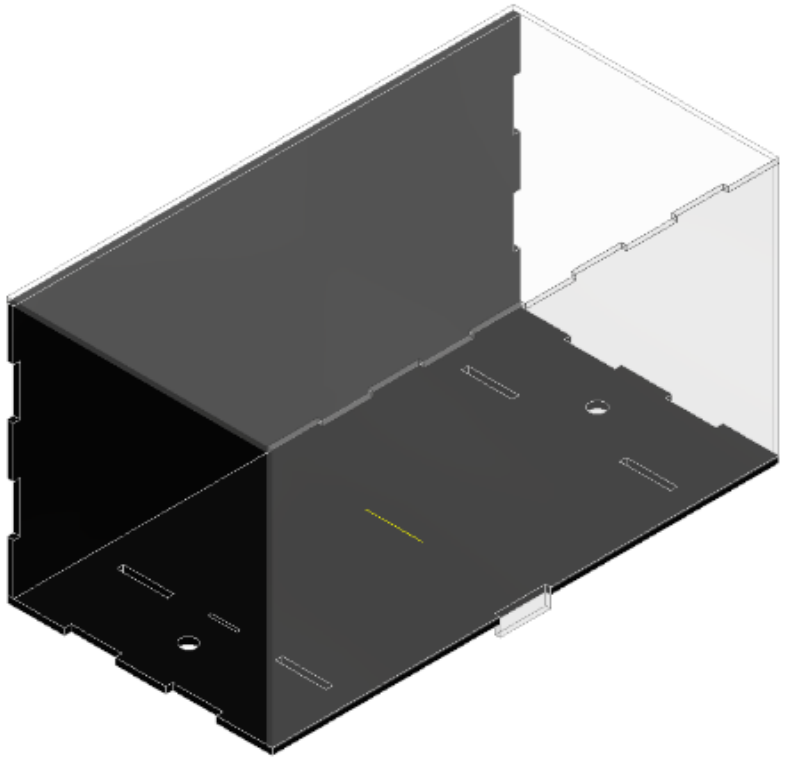
- Material: acrílico (visualización) + MDF (estructura y montaje de sensores)
- Sección transversal rectangular: facilita el montaje de modelos
- Longitud: 1 a 2 veces el lado de la sección transversal
- Dimensiones: 15 × 15 × 30 cm
- Índice de bloqueo (β_a): $\beta_a = A_m / Az$, recomendado 5–10%
- Corrección de velocidad con factor de Thom: $vc = v \cdot (1+\in)$

Características del prototipo

0.0225 m²
Área transversal

7.5 %
Índice de bloqueo máx.

0.0016875 m²
Área frontal de modelo permitida

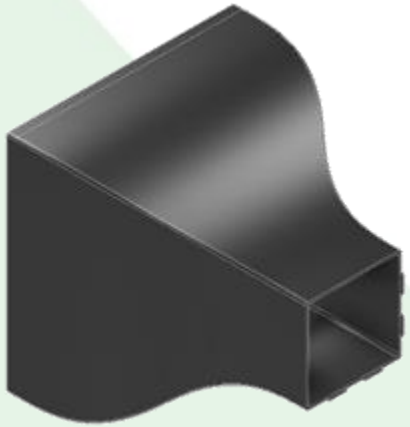


Cono de contracción

Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

Función: Incrementar la velocidad del flujo y mejorar su uniformidad antes de la zona de pruebas.

Rc = 6.08	Relación de contracción (rango óptimo: 4–10)
L = 37 cm	Longitud del cono = diámetro hidráulico de entrada
A_entrada = 1369 cm²	Perfil polinómico de grado 3, tipo “S”
Material: PETG	Impresión 3D — mayor resistencia que PLA

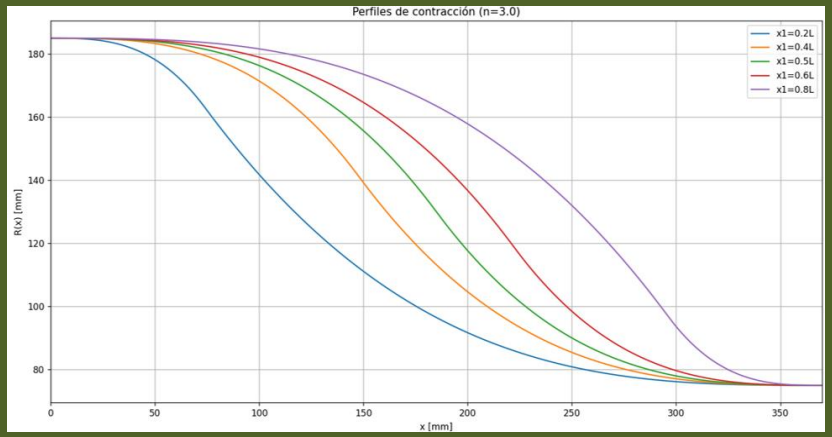


Ecuación del perfil

$$R(x) = 18.5 - A_1 x^n \quad , \quad x \leq x_1$$

$$R(x) = 7.5 + A_2 (37-x)^n \quad , \quad x \geq x_1$$

La curva más suave — con unión continua de pendientes en x_1 — se logró con un polinomio de grado 3, reduciendo el riesgo de desprendimiento de la capa límite.



Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

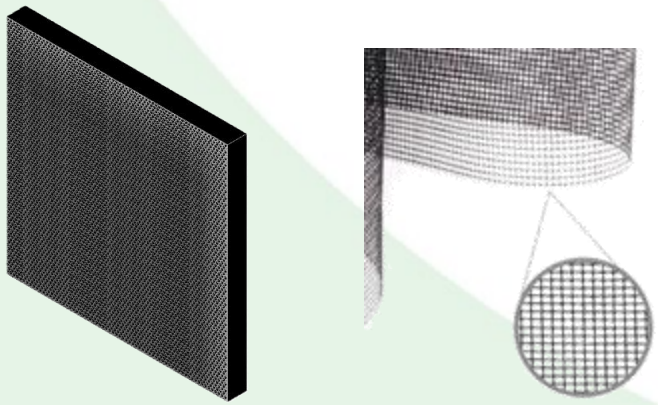
Cámara de asentamiento y difusor

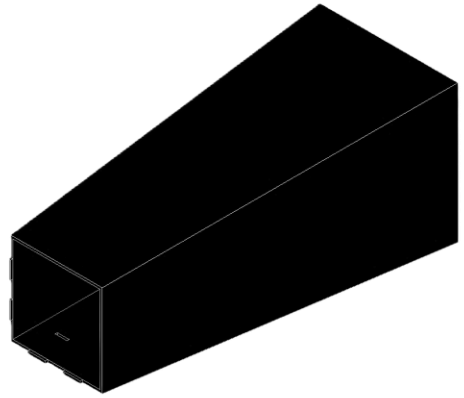
Cámara de asentamiento

- Honeycomb hexagonal: 2.891 cm de lado, 3.2 cm de longitud
- Porosidad honeycomb: $\beta_1 = 0.817$ (recomendado ≥ 0.8)
- Malla mosquitera adicional (1.8×1.8 mm), 0.02 m antes de la zona de prueba
- Porosidad malla: $\beta_2 = 0.746$ (rango 0.58–0.8)
- Relación L/Dh entre 6 y 10 para enderezamiento efectivo del flujo
- Fabricación: MDF cortado por láser

Difusor

- Forma rectangular (facilidad de construcción)
- Ángulo de inclinación: 4° (rango recomendado 2.5°–5°, máx. 6°)
- Área entrada: 0.0225 m² → Área salida: 0.0529 m²
- Relación de expansión ≈ 2.35 (rango recomendado 2–3)
- Longitud calculada: Ld = 0.572 m
- Función: reduce energía cinética y aumenta presión estática





Extractor y velocidad de diseño

Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

Mingletec MHF-D200

Alimentación	**110 VAC, monofásica**
Corriente	**0.53 A**
Potencia	**130 W**
Caudal	**900 m³/h**
Velocidad	**2600 RPM**
Ruido	**43 dB**



Velocidad teórica en zona de prueba

$$Vz = 11.11\ m/s$$

El rango de operación real del prototipo es de 0 a 9 m/s, considerando las pérdidas por eficiencia del ventilador y por el honeycomb/malla instalados en la cámara de asentamiento.

Posición preferida: después del difusor → garantiza menor turbulencia en la zona de pruebas.

Sistema de instrumentación y control

Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

1 Velocidad

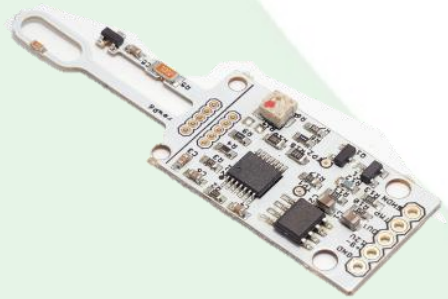
Wind Sensor Rev P (hilo caliente) — mide velocidad y temperatura

2 Visualización

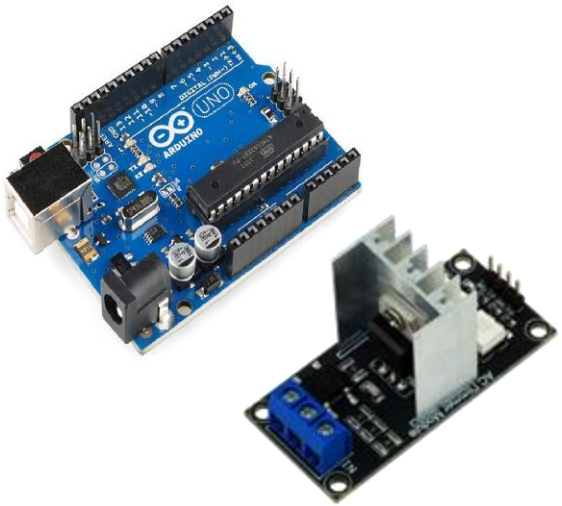
Máquina de humo LENSGO (agua destilada, glicerina y alcohol)

3 Control

Arduino Uno + dimmer con cruce por cero y optoacoplador







Sistema de instrumentación y control

Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

4 HMI

Pantalla circular ESP32S3, diseñada en SquareLine Studio (LVGL)

5 Seguridad

Fin de carrera en tapa, paro de emergencia, fusible, rango de ventilador 25–100%





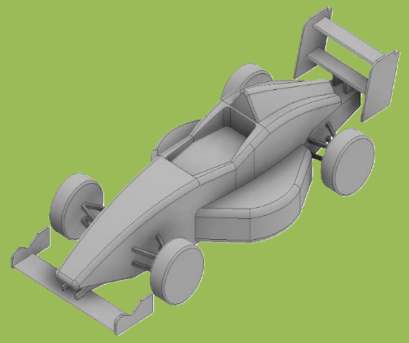




Consumo Energético: Potencia aproximada DC de 19W y potencia AC de 130W para el extractor.

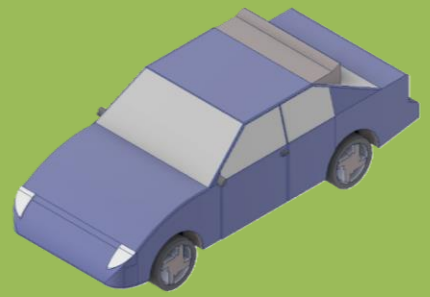
Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

Modelos de prueba



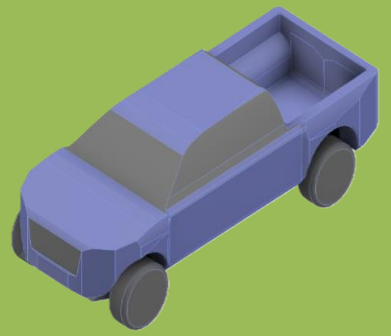
Modelo 1

Fórmula 1 simplificado



Modelo 2

Automóvil de uso común



Modelo 3

Camioneta tipo pickup

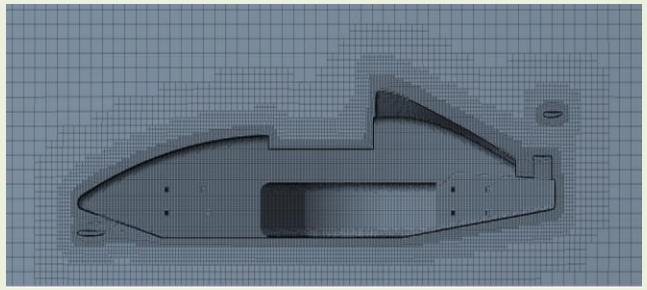
Configuración de la simulación CFD

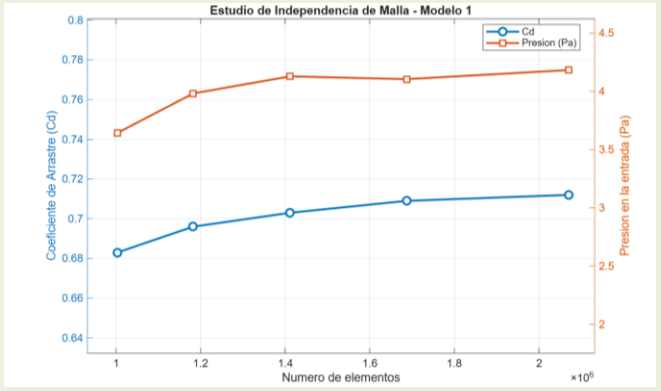
Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

General	
Gravedad en el eje Y	-9.81 m/s^2
Modelo de turbulencia	K – ω SST
Materiales	
Fluido - Aire	Densidad: 1.225 kg/m^3 Viscosidad: 1.7894e-05 kg/(m*s)
Condiciones de borde	
Inlet	Locación: Entrada zona de prueba Velocidad: 0 – 9 m/s Diámetro hidráulico: 0.15 m
outlet	Locación: Salida de zona de prueba Diámetro hidráulico: 0.15 m
wall	Condición de no deslizamiento Condición de pared fija
Cálculo de Ejecución	
Número de iteraciones	500
Métodos de solución	
Esquema	Coupled
Gradiente	Least Squares Cell Based
Pressure	Second Order
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
Specific Dissipation Rate	Second Order Upwind

Resultados CFD · Independencia de malla

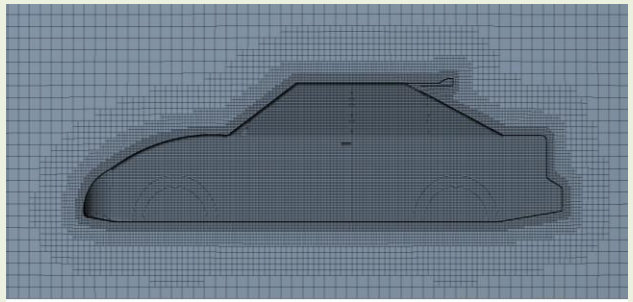
Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

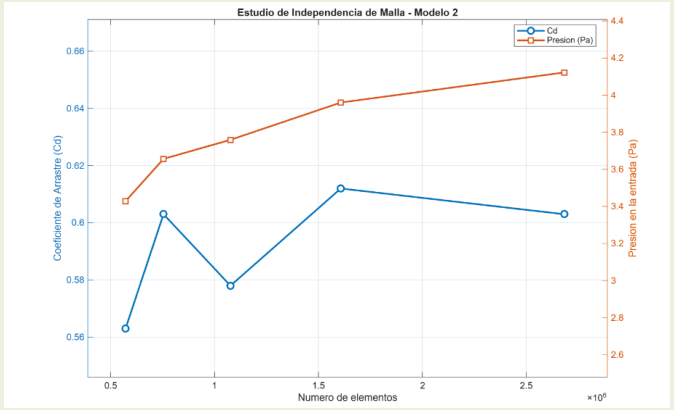




Modelo 1

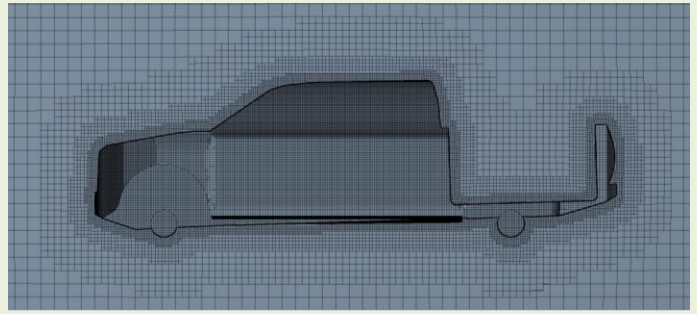
- **Elemento: 0.45 mm**
- **Error relativo: 2%**
- **Calidad ortogonal de 0.94**
- **Skewness de 0.072**

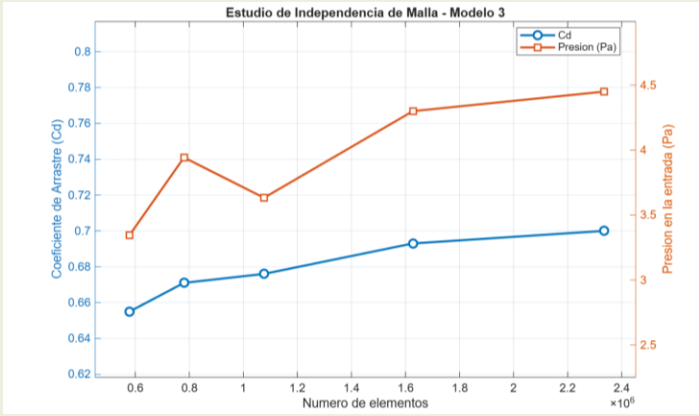




Modelo 2

- **Elemento: 0.35 mm**
- **Error relativo: 3%**
- **Calidad ortogonal de 0.96**
- **Skewness de 0.047**





Modelo 3

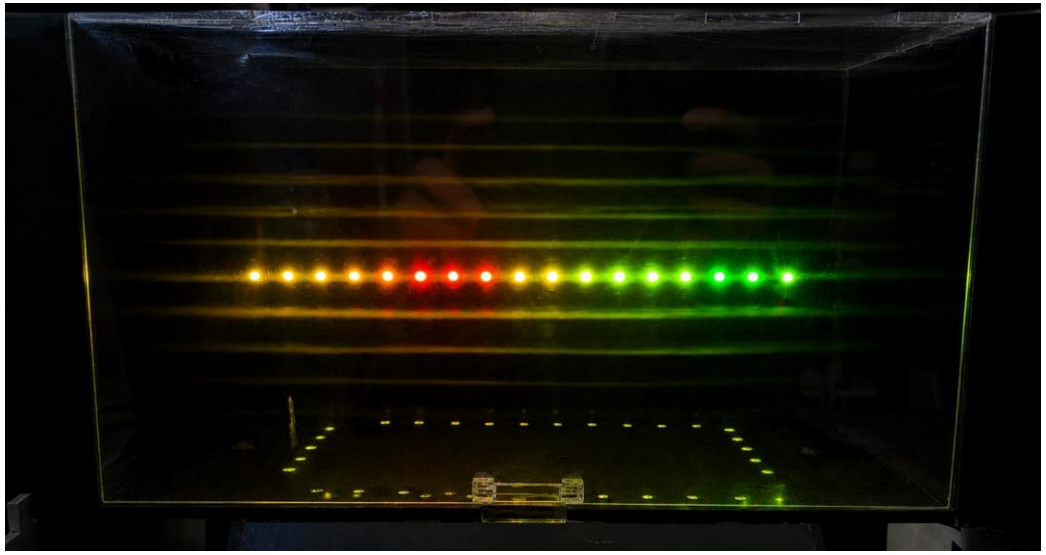
- **Elemento: 0.38 mm**
- **Error relativo: 3%**
- **Calidad ortogonal de 0.96**
- **Skewness de 0.056**

Comparación paneles/mallas

Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros



Funcionamiento sin honeycomb ni malla



Funcionamiento con honeycomb y malla

Caracterización experimental del flujo

Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

0 – 9 m/s

Rango de velocidad operativo

Ma ≈ 0.02

Flujo incompresible, régimen subsónico

Re = 7.2×10^4

Túnel vacío — régimen turbulento

≈ 1 %

Intensidad de turbulencia en la zona de prueba

Zona medida	Velocidad promedio	Intensidad de turbulencia
Sección transversal (matriz 3×3)	≈ 2.70 m/s	1%
Eje longitudinal	≈ 2.40 m/s	1%

Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

Resultados CFD · Coeficientes aerodinámicos

Simulaciones a velocidad de referencia de 7 m/s

Modelo	Cd (Arrastre)	Cl (Sustentación)	
1 · Fórmula 1	0.703	−0.212	Sustentación negativa (downforce) por diseño
2 · Auto de uso general	0.603	−0.098	Aerodinámica equilibrada, Cl cercano a 0
3 · Camioneta	0.700	0.186	Geometría poco aerodinámica; Cl positivo

Todos los modelos presentan formación de estela y vórtices en la parte posterior debido a la separación de la capa límite. Los valores de Y+ obtenidos (≈0–2) confirman un tratamiento de pared adecuado para el modelo K–ω SST.

Resultados Experimentales - CFD

Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

Modelo 1

N	Punto de referencia	Simulación CFD [m/s]	Prototipo [m/s]	Error absoluto [m/s]
V1	Punto de velocidad nula	0.76	0.82	0.06
V2	Punto de velocidad media	4.14	4.32	0.18
V3	Punto de velocidad máxima	8.92	9.21	0.29

Modelo 2

N	Punto de referencia	Simulación CFD [m/s]	Prototipo [m/s]	Error absoluto [m/s]
V1	Punto de velocidad nula	0.34	0.29	0.05
V2	Punto de velocidad media	5.16	5.42	0.26
V3	Punto de velocidad máxima	9.47	9.13	0.34

Modelo 3

N	Punto de referencia	Simulación CFD [m/s]	Prototipo [m/s]	Error absoluto [m/s]
V1	Punto de velocidad nula	0.44	0.61	0.17
V2	Punto de velocidad media	6.45	6.09	0.36
V3	Punto de velocidad máxima	8.34	8.63	0.29

Resultados CFD · Contornos de velocidad

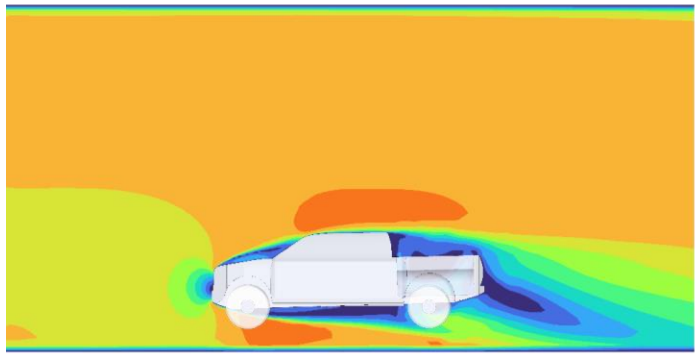
Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros



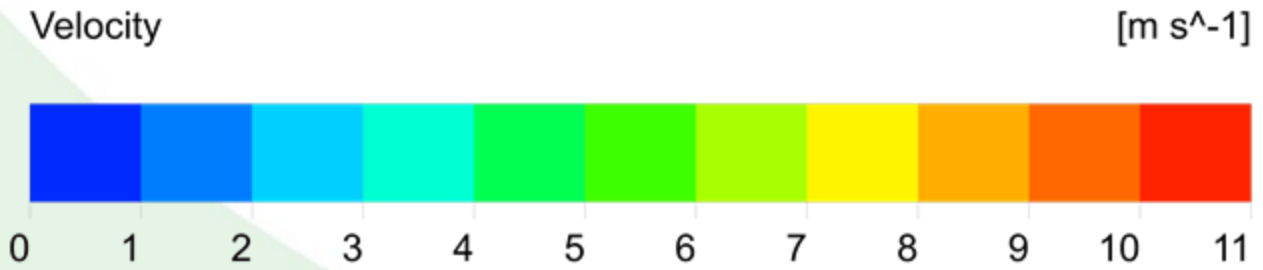
Modelo 1



Modelo 2

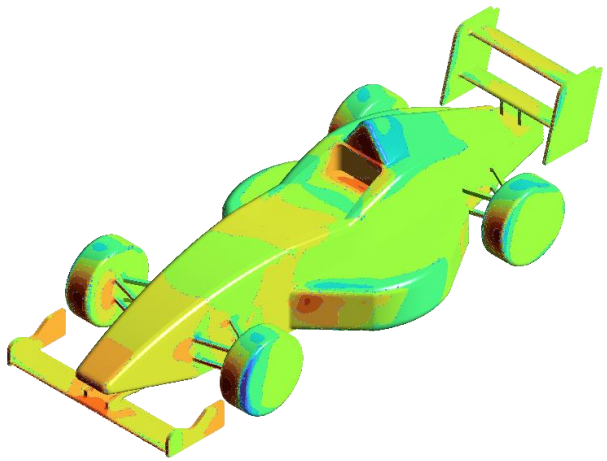


Modelo 3

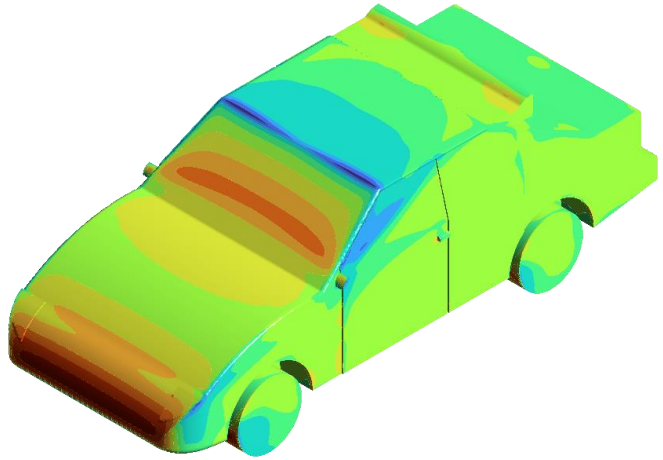


Resultados CFD · Contornos de presión

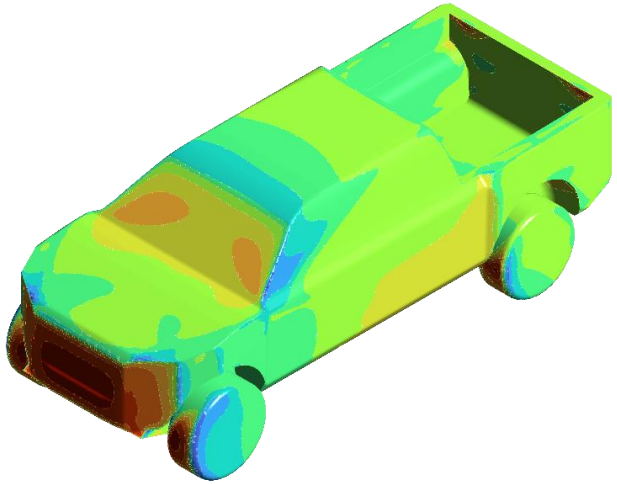
Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros



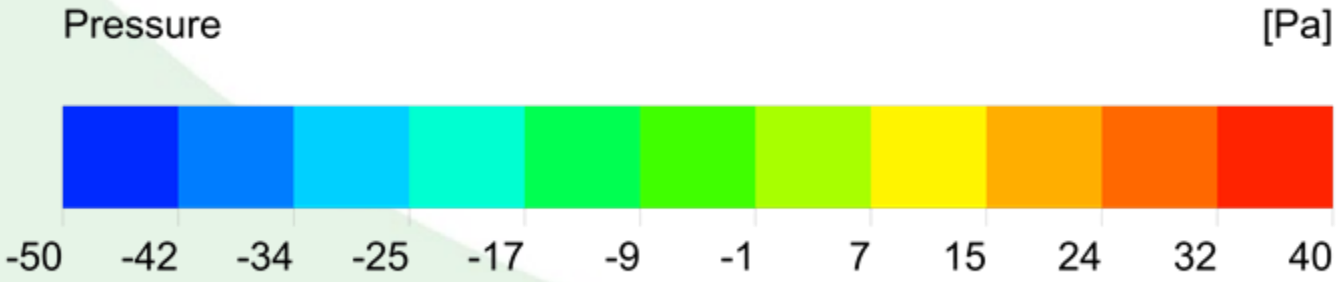
Modelo 1



Modelo 2



Modelo 3



Resultados CFD · Contornos de Y+

Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros



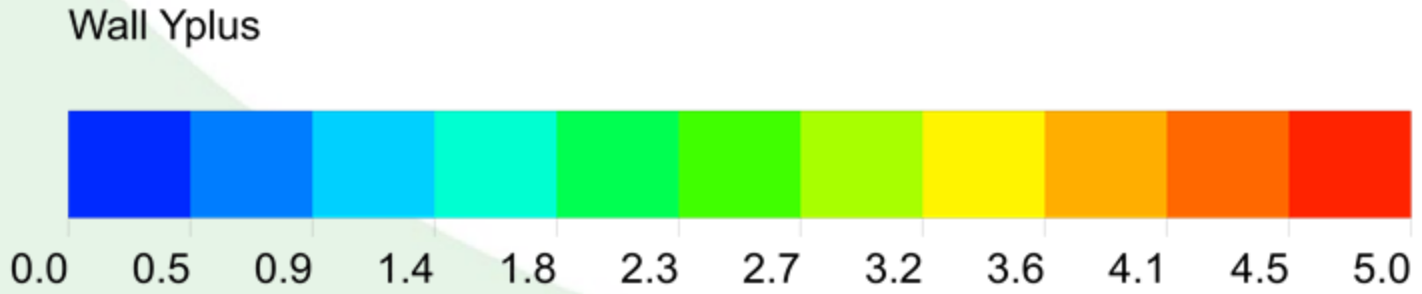
Modelo 1



Modelo 2



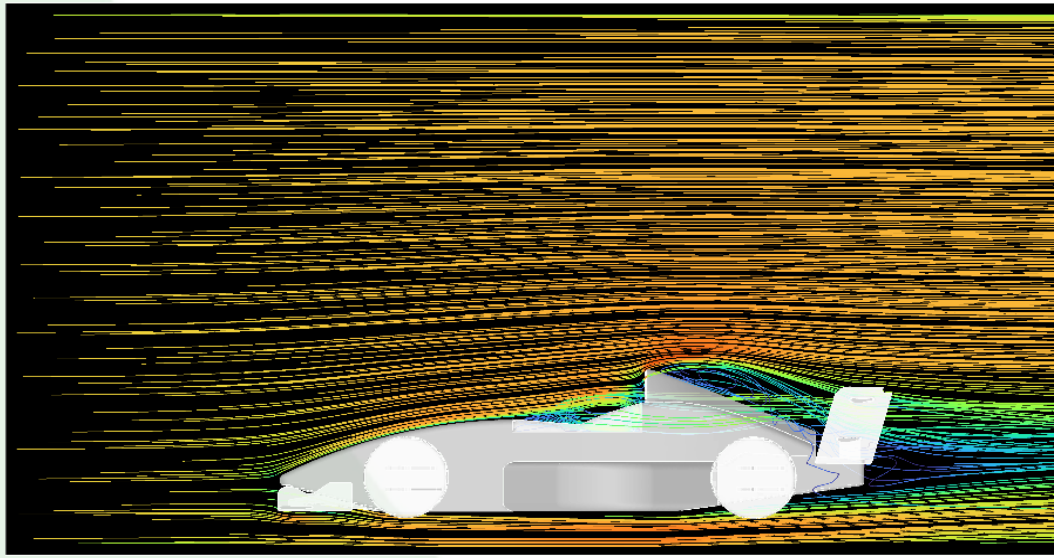
Modelo 3

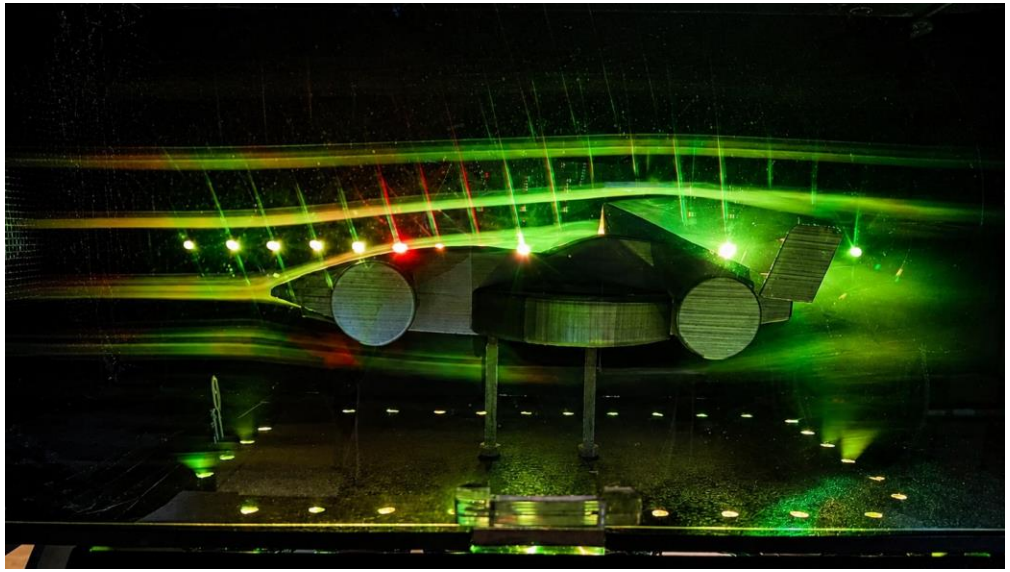


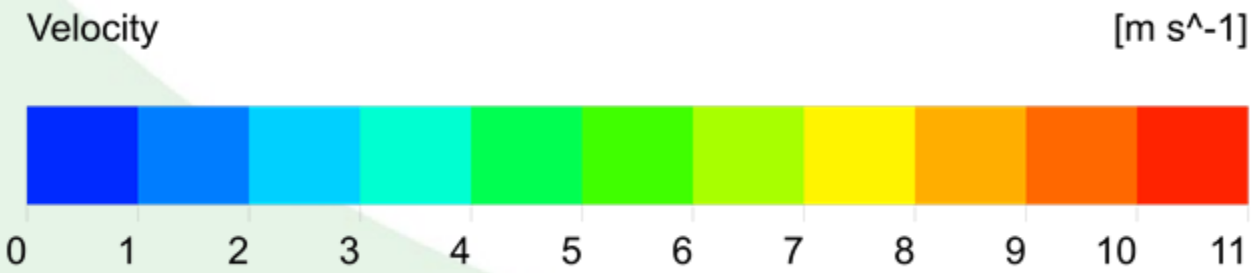
Resultados CFD · Líneas de flujo

Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

Modelo 1



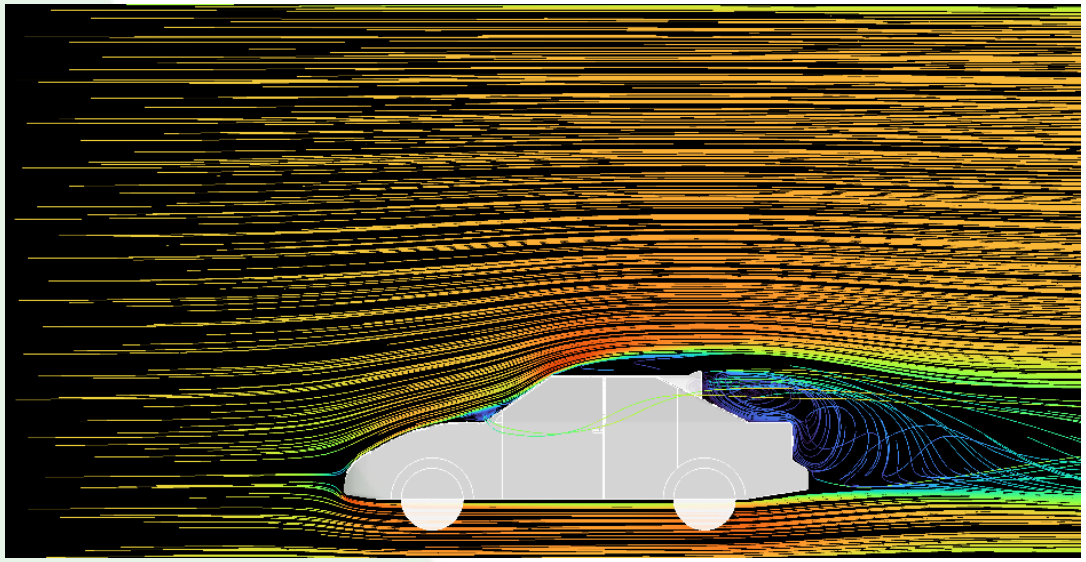




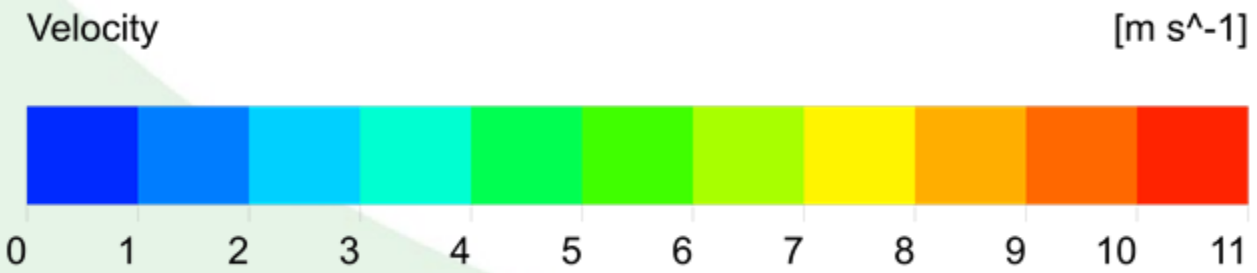
Resultados CFD · Líneas de flujo

Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

Modelo 2



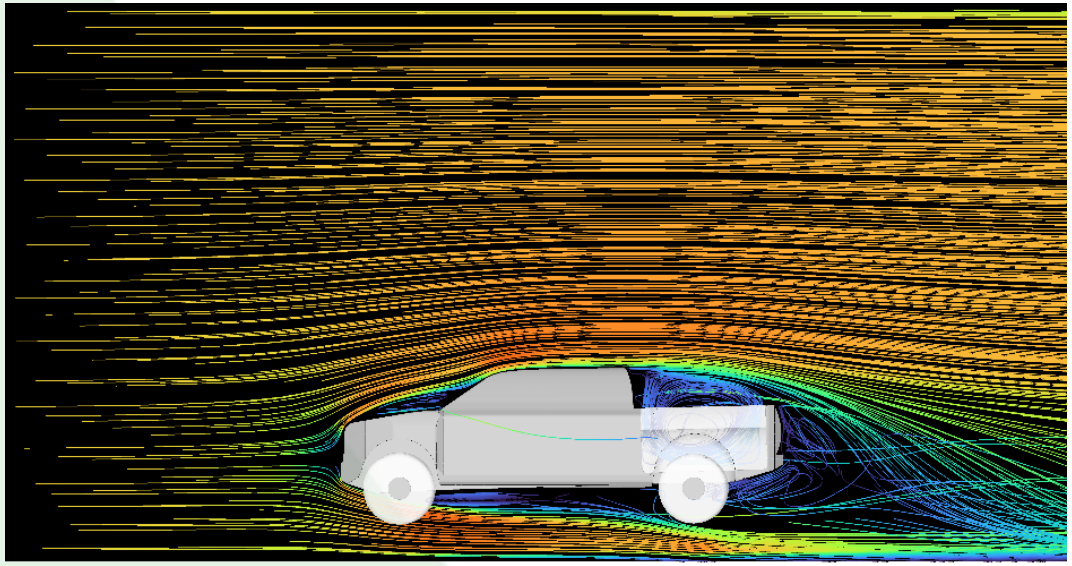


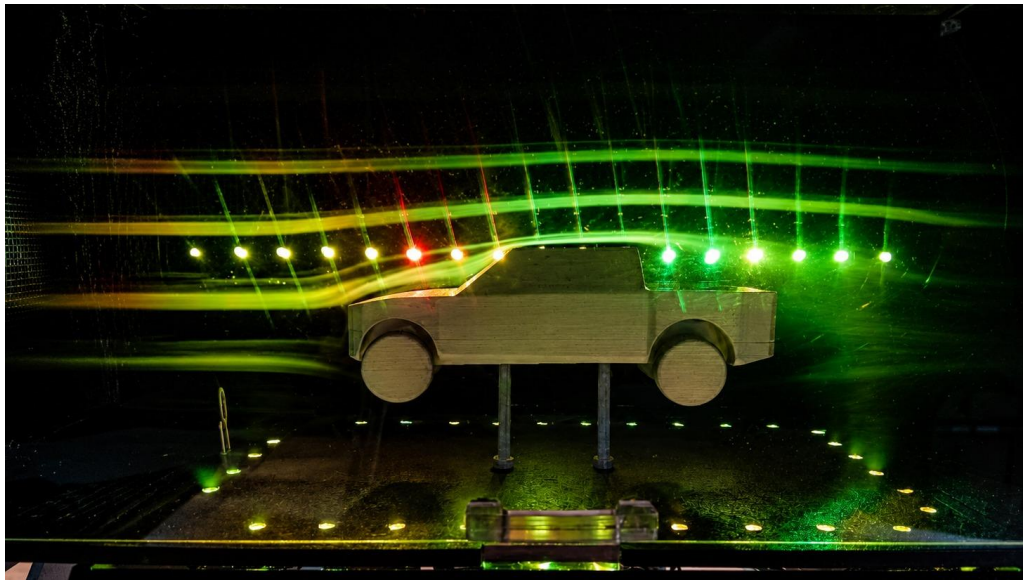


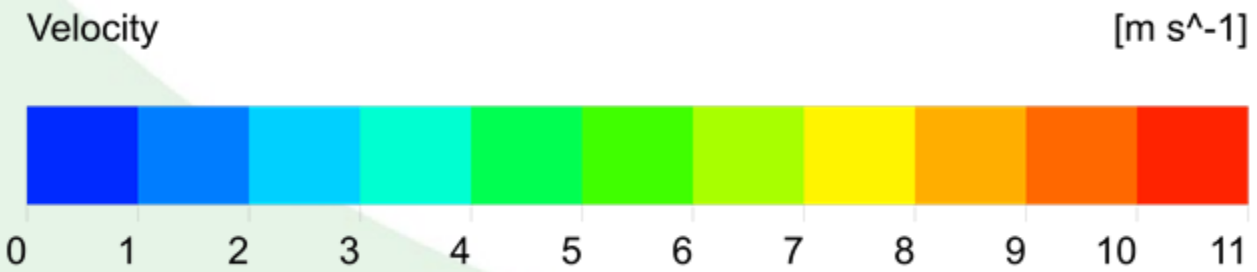
Resultados CFD · Líneas de flujo

Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

Modelo 3







Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

Limitaciones observadas

- La velocidad máxima real (9 m/s) no alcanza el valor teórico por eficiencia del ventilador debido a pérdidas del honeycomb/malla.
- La visualización con humo es más clara a velocidades bajas (≤ 2 m/s) por la capacidad de la máquina.
- Las presiones generadas en ciertas zonas son muy pequeñas para algunos sensores disponibles.
- Los modelos de prueba están limitados por el índice de bloqueo (hasta 7.5% con corrección).
- El tiempo de uso de la máquina de humo debe respetar el manual del equipo para evitar daños.

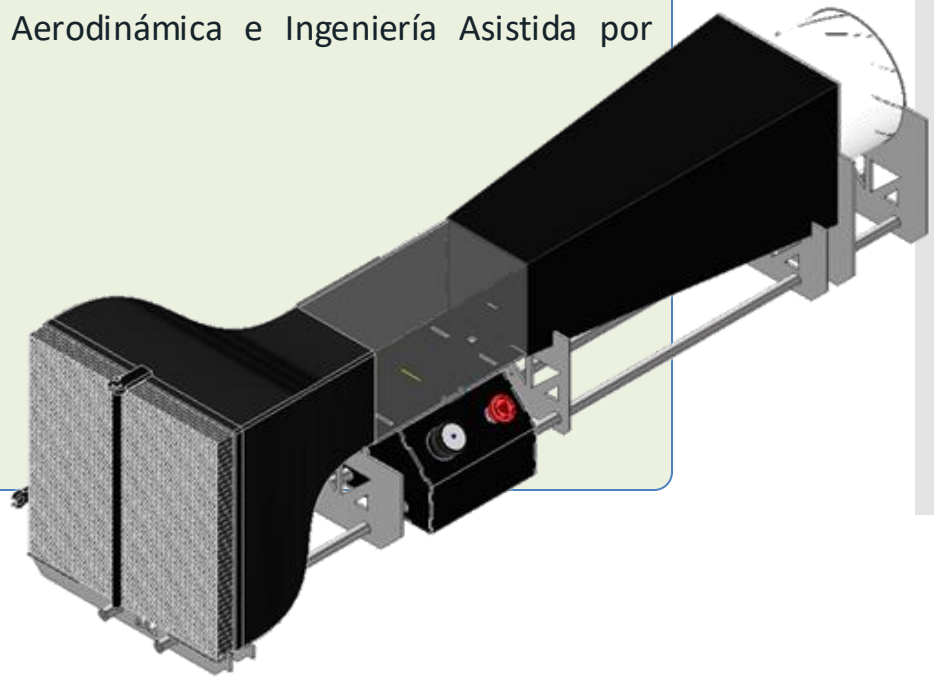
Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

CAPÍTULO V

Alcance y limitaciones

Alcance tecnológico del prototipo

- Permite el estudio de fenómenos aerodinámicos mediante la visualización de líneas de flujo, medición de la variable física de velocidad y análisis CFD.
- Integra sensores, actuadores y una pantalla HMI para el monitoreo, control y adquisición de datos en tiempo real.
- Complementa las simulaciones CFD con un diseño compacto que facilita el mantenimiento, la validación experimental y el reemplazo y mejora de componentes.
- Constituye una herramienta didáctica para Mecánica de Fluidos, Aerodinámica e Ingeniería Asistida por Computador, con posibilidad de ampliar su instrumentación.



Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

CAPÍTULO V

Conclusiones

- Se diseñó, construyó e instrumentó un túnel de viento de circuito abierto y baja velocidad, funcional para el Laboratorio de Mecanismos y Simulación Numérica de la ESPE.
- La revisión bibliográfica permitió definir criterios de diseño geométrico (honeycomb, cono, zona de pruebas, difusor) que reducen la turbulencia y homogeneizan el flujo.
- El rango de velocidad (0–9 m/s) corresponde a Ma ≈ 0.02, confirmando régimen subsónico incompresible; Re = 7.2×10^4 confirma flujo turbulento en el túnel vacío.
- Se obtuvieron velocidades medias de 2.7 m/s en la sección transversal y 2.4 m/s en el eje longitudinal, con una intensidad de turbulencia cercana al 1 %, indicando una adecuada uniformidad del flujo.
- La validación de velocidad en la región de la estela mostró una adecuada concordancia entre los resultados CFD y experimentales. Las diferencias registradas oscilaron entre 0.06 y 0.29 m/s para el modelo 1, entre 0.05 y 0.34 m/s para el modelo 2 y entre 0.17 y 0.29 m/s para el modelo 3, corroborando la validez del modelo numérico y del prototipo experimental.
- Los coeficientes aerodinámicos obtenidos fueron consistentes con la geometría de los modelos analizados. El modelo tipo Fórmula 1 presentó un Cd de 0.703 y un Cl de -0.212 debido a su diseño orientado a generar carga aerodinámica negativa; el modelo 2 registró un Cd de 0.603 y un Cl de -0.098, asociados a una menor resistencia al avance; mientras que la camioneta alcanzó un Cd de 0.700 y un Cl de 0.186, reflejando una mayor resistencia y sustentación producto de su mayor área frontal.

Antecedentes
Justificación
Prroblemas
Objetivos
Principios de aerodinámica
Tipos de túneles de viento
Diseño mecánico
Instrumentación
Simulación CFD
Pruebas experimentales
CFD y análisis comparativo
Discusión de los resultados
Conclusiones
Recomendaciones
Trabajos futuros

CAPÍTULO V

Recomendaciones y trabajos futuros

Recomendaciones

- Realizar mantenimiento preventivo periódico al ventilador, máquina de humo y manguera.
- Ensayar diferentes modelos a escala simplificados, verificando que esté dentro de la escala permitida y permita verificar las líneas de flujo .
- Verificar periódicamente el estado y la calibración del sensor de velocidad, utilizando un sensor de referencia.
- Realizar las pruebas en un ambiente cerrado y libre de perturbaciones, con iluminación controlada, evitando corrientes de aire que alteren la visualización y uniformidad de las líneas de flujo.

Propuestas de extensión

- Sensores de fuerza/torque/presión (galgas, celdas de carga, presión) para Cd y Cl experimentale.
- Sistema de control térmico del flujo de aire.
- Técnicas avanzadas: velocimetría por imágenes de partículas (PIV).
- Repotenciar el sistema de impulsion.