

# UNIVERSIDAD MODELO

Escuela Modelo — Ingeniería Automotriz

---

## PROPUESTA DE DISEÑO DE UN TÚNEL DE VIENTO MODULAR CON SISTEMA DE VISUALIZACIÓN DIGITAL DE FLUJO

---

### **Alumnos:**

Recoder Castillo Dana Sofia  
Saldívar Mateo Alexis  
Pat Garnica José  
Pérez Balan Luis  
Manrique Flores Adrián

Asignatura: Proyectos II  
Docente: Vanessa Cob Gutiérrez  
Fecha: 3 de marzo del 2026  
Mérida, Yucatán, México

## Índice de Contenido

<b>Capítulo I. Antecedentes de Investigación</b>	<b>3</b>
1. Definición del Problema de Estudio	3
2. Marco Teórico (Revisión de la Literatura)	3
3. Marco Conceptual	5
4. Objetivo General y Específicos	7
5. Alcances de la Investigación	7
6. Justificación de la Investigación	8
7. Propuesta de Valor	9
<b>Capítulo II. Materiales</b>	<b>11</b>
1. Lista de Materiales y Requerimientos — Tabla 1	11
2. Cotizaciones (3 proveedores) — Tabla 2	14
3. Comparación de Precios y Calidad — Tabla 3	15
4. Presupuesto y Costos Finales de Materiales — Tabla 4	17
5. Compra y Verificación Física — Tabla 5	20
<b>Capítulo III. Cálculos, Ecuaciones y Diagramas</b>	<b>22</b>
1. Cálculos, Ecuaciones y Fórmulas — Tabla 6	23
2. Diseño y Bocetaje — Tabla 7	26
3. Lista de Piezas Principales y Secundarias — Tabla 8	29
<b>Capítulo IV. Proceso de Construcción</b>	<b>36</b>
Figura 1. Corte de listones con sierra caladora eléctrica	36
Figura 2. Inspección de piezas de madera cortadas	36
Figura 3. Ensamblaje con sierra caladora y pegamento	36
Figura 4. Clavado y unión de piezas de la estructura	36
Figura 5. Ensamblaje de la cámara de prueba rectangular	36
Figura 6. Perforación de tapa del ventilador con taladro	36
Figura 7. Estructura modular ensamblada (vista lateral)	37
Figura 8. Anemómetro digital para medición de velocidad	37
Figura 9. Microcontrolador Arduino UNO R3 con cable USB	37
Figura 10. Fuente de alimentación, módulo LCD y sensores	37
Figura 11. Componentes electrónicos adicionales del sistema	38
<b>Referencias</b>	<b>39</b>
<b>Anexos</b>	<b>41</b>
Anexo A. Diagrama de Gantt — Tabla 9	41
Anexo B. Pasaporte de Validación del Proyecto	42

# Capítulo I. Antecedentes de Investigación

## 1. Definición del Problema de Estudio

La aerodinámica es una disciplina fundamental dentro de la ingeniería automotriz, ya que determina el comportamiento de los vehículos frente al flujo de aire, influyendo directamente en el consumo de combustible, la estabilidad a altas velocidades, el rendimiento térmico y la seguridad activa del automóvil. Sin embargo, en el ámbito educativo, particularmente en instituciones de nivel superior en México, el aprendizaje de estos principios se ha limitado históricamente a la teoría, la resolución de problemas numéricos y, en el mejor de los casos, a simulaciones computacionales, sin ofrecer al estudiante la posibilidad de experimentar de manera directa y tangible con el fenómeno aerodinámico real.

Esta limitación se origina en gran medida por la escasez de equipos de laboratorio especializados en aerodinámica a nivel universitario. Los túneles de viento industriales, que representan la herramienta experimental por excelencia para el análisis aerodinámico, tienen costos de adquisición que oscilan entre decenas y cientos de miles de dólares (Barlow et al., 1999), lo que hace prácticamente inviable su incorporación en laboratorios académicos de universidades con presupuestos limitados. Adicionalmente, los pocos equipos de escala educativa disponibles en el mercado suelen ser rígidos, de difícil mantenimiento y carecen de sistemas de visualización y medición que permitan al estudiante analizar cuantitativamente los resultados obtenidos.

En consecuencia, los estudiantes de Ingeniería Automotriz concluyen su formación con una comprensión superficial de los fenómenos aerodinámicos, sustentada únicamente en ecuaciones abstractas y simulaciones computacionales que, aunque útiles, no desarrollan plenamente las competencias prácticas necesarias para la resolución de problemas de ingeniería en el entorno profesional. Esta brecha entre la teoría y la práctica experimental representa un problema educativo de carácter estructural que impacta negativamente en la calidad de la formación técnica de los futuros ingenieros.

Ante este panorama, se identifica la necesidad de desarrollar una solución experimental asequible, funcional y didáctica que permita a los estudiantes interactuar directamente con el flujo de aire real, observar los patrones aerodinámicos generados por distintas geometrías y recopilar datos medibles que puedan ser analizados e interpretados con criterio técnico. En respuesta a esta necesidad, el presente proyecto propone el diseño de un túnel de viento modular, de circuito abierto, con sistema de visualización de flujo mediante humo e iluminación LED, y sistema de medición digital básica mediante sensores de velocidad conectados a un microcontrolador, que sea económicamente accesible y replicable en cualquier laboratorio de ingeniería de nivel superior.

El problema central que orienta esta investigación puede formularse de la siguiente manera: ¿Cómo puede diseñarse un túnel de viento modular de bajo costo que, mediante la integración de un sistema de visualización digital de flujo, permita al estudiante de Ingeniería Automotriz realizar análisis aerodinámicos experimentales con un nivel técnico adecuado para el contexto académico?

## 2. Marco Teórico (Revisión de la Literatura)

El estudio de la aerodinámica experimental tiene sus raíces en el siglo XIX, cuando Osborne Reynolds y Ernst Mach sentaron las bases matemáticas y experimentales que describían el

comportamiento del flujo de fluidos. Sin embargo, fue el desarrollo del primer túnel de viento funcional por parte de Wenham y Browning en 1871, bajo la dirección de la Aeronautical Society of Great Britain, el hito que marcó el inicio de la experimentación sistemática con flujo de aire controlado (Anderson, 2017). Desde entonces, los túneles de viento han evolucionado desde dispositivos rudimentarios hasta sofisticados laboratorios aeroespaciales capaces de alcanzar velocidades supersónicas e hipersónicas.

En el contexto educativo y de baja velocidad, los trabajos de Barlow et al. (1999) representan la referencia técnica más completa sobre el diseño, construcción y operación de túneles de viento de baja velocidad. Su obra describe en detalle los principios de diseño de las secciones de contracción, sección de prueba, difusor y sistema de propulsión, así como los criterios para garantizar un flujo uniforme, de baja turbulencia y controlado dentro de la zona de ensayo. En particular, los autores subrayan la importancia del coeficiente de contracción, definido como la razón entre el área de la cámara de asentamiento y el área de la sección de prueba, para lograr una distribución de velocidades uniforme.

Los fundamentos físicos que gobiernan el comportamiento del flujo en un túnel de viento se derivan directamente de la mecánica de fluidos clásica. La ecuación de continuidad, que expresa la conservación de la masa en un fluido incompresible, establece que el producto del área de la sección transversal por la velocidad del flujo debe permanecer constante a lo largo del túnel. Formalmente, esta relación se expresa como  $A_1 V_1 = A_2 V_2$ , donde  $A$  representa el área de la sección transversal y  $V$  la velocidad del fluido en dicha sección (Çengel y Cimbala, 2018). Este principio explica por qué el flujo se acelera al pasar por la sección de contracción del túnel.

El principio de Bernoulli, derivado de la ecuación de la energía para flujos incompresibles y sin fricción, establece que a lo largo de una línea de corriente existe una relación inversa entre la presión estática y la velocidad del fluido. La forma simplificada de la ecuación de Bernoulli para flujo incompresible es:  $P + \frac{1}{2}\rho V^2 = \text{constante}$ , donde  $P$  es la presión estática,  $\rho$  es la densidad del fluido y  $V$  es la velocidad local del flujo (White, 2016). En el contexto del túnel de viento, este principio es fundamental para comprender la generación de fuerzas de sustentación y la distribución de presiones alrededor de perfiles aerodinámicos.

El número de Reynolds ( $Re$ ) es el parámetro adimensional más importante en la caracterización del régimen de flujo en experimentos aerodinámicos. Este número representa la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas del fluido, y se define como  $Re = \rho V L / \mu$ , donde  $L$  es la longitud característica del modelo y  $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido. Valores de Reynolds menores a aproximadamente 2,300 corresponden a flujo laminar; valores superiores a 4,000 indican flujo turbulento, mientras que el intervalo intermedio define la zona de transición (Fox et al., 2015). En el diseño de túneles de viento educativos, es crítico garantizar que el número de Reynolds del modelo ensayado sea suficientemente representativo de las condiciones reales de operación, aunque la similitud dinámica completa suele ser un objetivo difícil de alcanzar a escala reducida.

Las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre un cuerpo sumergido en un flujo de aire pueden descomponerse en dos componentes principales: la fuerza de arrastre (drag), que actúa en la dirección del flujo y se opone al movimiento del cuerpo; y la fuerza de sustentación (lift), que actúa perpendicularmente a la dirección del flujo. Estas fuerzas se expresan en función de los coeficientes adimensionales de arrastre ( $C_d$ ) y sustentación ( $C_l$ ), definidos como:  $F_d = \frac{1}{2}\rho V^2 A C_d$  y  $F_l = \frac{1}{2}\rho V^2 A C_l$ , donde  $A$  es el área de referencia del modelo (Anderson, 2017). La determinación experimental de estos coeficientes a través del ensayo en túnel de viento constituye uno de los objetivos fundamentales de la ingeniería aerodinámica aplicada.

La visualización del flujo es una técnica experimental que permite hacer visible el comportamiento del campo de velocidades alrededor del modelo ensayado. Tradicionalmente, esta visualización

se ha logrado mediante la inyección de humo o partículas en el flujo de aire. Técnicas modernas incluyen la Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV), la Anemometría Láser Doppler (LDA) y la Schlieren Photography (Barlow et al., 1999). En el contexto de túneles de viento educativos, la visualización mediante generadores de humo y sistemas de iluminación de alto contraste representa un método efectivo, económico y de gran impacto visual para ilustrar fenómenos como la separación de capa límite, la formación de vórtices y el comportamiento del flujo laminar versus turbulento.

Varios autores han documentado experiencias exitosas en el diseño y construcción de túneles de viento de bajo costo para aplicaciones educativas. Barlow et al. (1999) describen diseños de sección de prueba de circuito abierto que pueden construirse con materiales accesibles como madera, acrílico y sistemas de ventilación comerciales. Pope y Harper (1966, citados en Barlow et al., 1999) establecen que un túnel de viento educativo debe priorizar la uniformidad del flujo en la sección de prueba sobre la velocidad máxima alcanzable, dado que la calidad del flujo determina la validez de los resultados experimentales. En este sentido, el diseño propuesto en el presente proyecto incorpora una sección de contracción suave y un sistema de paneles de rejilla para homogeneizar el flujo, siguiendo estas recomendaciones de la literatura.

Desde la perspectiva pedagógica, el aprendizaje basado en la experimentación ha sido ampliamente respaldado por la literatura en educación en ingeniería. Felder y Silverman (1988, citados en Merrill, 2002) establecen que los estudiantes de ingeniería exhiben un predominio de estilos de aprendizaje activo y sensorial, lo que implica que el aprendizaje es más efectivo cuando se combina la teoría con la experiencia práctica y la manipulación de equipos reales. En este contexto, un túnel de viento modular de laboratorio no solo facilita la comprensión de los conceptos aerodinámicos fundamentales, sino que también desarrolla competencias prácticas esenciales como la instrumentación, la toma de datos experimentales, el análisis de incertidumbre y la interpretación de resultados.

### 3. Marco Conceptual

Para una comprensión adecuada del presente proyecto, se definen a continuación los términos técnicos y conceptos clave que estructuran el desarrollo de la investigación y el diseño propuesto.

**Aerodinámica.** Rama de la mecánica de fluidos que estudia el comportamiento del flujo de gases, especialmente el aire, alrededor de cuerpos sólidos en movimiento relativo. En el contexto automotriz, la aerodinámica determina las fuerzas que actúa el aire sobre el vehículo y su influencia en el desempeño, la estabilidad y la eficiencia energética (Anderson, 2017).

**Túnel de viento.** Dispositivo experimental que permite replicar las condiciones de flujo de aire alrededor de un objeto manteniendo el modelo fijo y desplazando el aire a través del mismo mediante un sistema de propulsión controlado. Esta inversión del movimiento relativo permite estudiar las fuerzas aerodinámicas, los patrones de flujo y la distribución de presiones sobre el modelo en condiciones controladas y reproducibles (Barlow et al., 1999).

**Túnel de viento modular.** Variante del túnel de viento convencional en la que la estructura principal está compuesta por secciones desmontables e intercambiables. Esta característica facilita el mantenimiento, el transporte, la adaptación de la sección de prueba a distintos modelos y la posibilidad de expandir o modificar el equipo según las necesidades experimentales (Barlow et al., 1999).

**Circuito abierto.** Configuración de túnel de viento en la que el aire es tomado del ambiente exterior en la entrada del dispositivo, circula a través de las diferentes secciones del túnel y es expulsado nuevamente al ambiente en la salida. Esta configuración es más sencilla y económica

de construir que los circuitos cerrados o de retorno, aunque presenta mayor sensibilidad a las condiciones ambientales (Barlow et al., 1999).

**Sección de prueba.** Zona del túnel de viento donde se coloca el modelo a ensayar. Esta sección debe garantizar un flujo uniforme, de baja turbulencia y con una distribución de velocidades homogénea en toda su área transversal. En el presente proyecto, la sección de prueba está fabricada en acrílico transparente para permitir la observación visual directa del flujo y la visualización con humo e iluminación LED.

**Sección de contracción.** Componente del túnel de viento ubicado entre la cámara de asentamiento y la sección de prueba, cuya función es acelerar el flujo de aire y reducir su nivel de turbulencia. El diseño de la contracción, caracterizado por su coeficiente de contracción (razón entre el área de entrada y el área de salida), es crítico para la calidad del flujo en la zona de ensayo (Çengel y Cimbala, 2018).

**Perfil aerodinámico.** Geometría diseñada para optimizar la interacción con el flujo de aire, minimizando la resistencia aerodinámica y, en su caso, maximizando la fuerza de sustentación. Los perfiles NACA son los más utilizados en ingeniería aeronáutica y automotriz, y sus coeficientes aerodinámicos han sido ampliamente documentados en la literatura (Anderson, 2017).

**Visualización de flujo.** Conjunto de técnicas experimentales que permiten hacer visible el comportamiento del campo de velocidades y las líneas de corriente alrededor del modelo ensayado. En el presente proyecto se emplea la técnica de visualización por humo, en la que un generador introduce una corriente de partículas finas al flujo de aire, haciendo visible su trayectoria bajo la iluminación de las tiras LED instaladas en la sección de prueba.

**Línea de corriente.** Curva tangente al vector velocidad del fluido en cada punto del campo de flujo en un instante determinado. En flujo estacionario, las líneas de corriente coinciden con las trayectorias de las partículas de fluido, por lo que su visualización permite inferir la distribución de velocidades y la presencia de zonas de separación o recirculación (White, 2016).

**Capa límite.** Región de fluido adyacente a la superficie del modelo donde los efectos viscosos son significativos y la velocidad del fluido varía desde cero en la pared (condición de no deslizamiento) hasta la velocidad del flujo libre. El comportamiento de la capa límite —si permanece adherida a la superficie o se separa— determina en gran medida el coeficiente de arrastre del modelo (White, 2016).

**Coficiente de arrastre (Cd).** Parámetro adimensional que cuantifica la resistencia aerodinámica de un cuerpo en relación con la presión dinámica del flujo libre y el área de referencia del modelo. Un valor menor de Cd indica una geometría más aerodinámica. Los vehículos modernos de producción presentan coeficientes de arrastre en el rango de 0.25 a 0.35 (Anderson, 2017).

**Número de Reynolds (Re).** Número adimensional que expresa la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas en un fluido. Determina el régimen del flujo (laminar, de transición o turbulento) y es el parámetro de similitud dinámica fundamental en el escalado de experimentos aerodinámicos (Fox et al., 2015).

**Anemómetro.** Instrumento de medición que permite cuantificar la velocidad del flujo de aire. En el presente proyecto se emplea un sensor anemómetro digital de bajo costo conectado a un microcontrolador Arduino para registrar la velocidad del flujo en la sección de prueba en tiempo real.

**Microcontrolador Arduino.** Plataforma de hardware y software libre de código abierto basada en un microcontrolador de arquitectura AVR, ampliamente utilizada en proyectos educativos y de

prototipado por su facilidad de programación y su compatibilidad con una amplia variedad de sensores y actuadores. En el contexto del presente proyecto, el Arduino actúa como unidad de adquisición de datos del sensor de velocidad.

## 4. Objetivo General y Específicos

### Objetivo General

Diseñar un túnel de viento modular de circuito abierto con sistema de visualización digital básica de flujo que permita analizar de manera experimental el comportamiento aerodinámico de modelos a escala en un entorno académico universitario de ingeniería automotriz, contribuyendo al desarrollo de competencias prácticas en los estudiantes mediante la integración de herramientas de medición digital asequibles y metodologías de experimentación reproducibles.

### Objetivos Específicos

- Diseñar una estructura desmontable y modular de al menos cuatro secciones independientes (entrada/rejilla, contracción, sección de prueba y difusor/extractor) que facilite el ensamblaje, el mantenimiento y el transporte del equipo, utilizando materiales de bajo costo disponibles en el mercado local.
- Integrar un sistema de visualización de flujo compuesto por un generador de humo de baja toxicidad y tiras de iluminación LED de alta luminosidad instaladas en el interior de la sección de prueba transparente, que permita observar y registrar visualmente las líneas de corriente y los fenómenos de separación de flujo alrededor de los modelos ensayados.
- Incorporar un sistema de medición digital básica de la velocidad del flujo de aire, mediante un sensor anemómetro conectado a un microcontrolador Arduino y una interfaz de visualización de datos en tiempo real, capaz de registrar velocidades dentro del rango operativo de diseño del túnel.
- Evaluar el desempeño aerodinámico comparativo de al menos tres modelos a escala de diferente geometría —incluyendo un perfil NACA, un modelo de cuerpo romo y un modelo de cuerpo aerodinámico simplificado— mediante la observación del patrón de flujo y la estimación cualitativa del coeficiente de arrastre relativo.
- Verificar la uniformidad del perfil de velocidades en la sección de prueba del túnel mediante la comparación de mediciones en múltiples puntos de la sección transversal, con el objetivo de validar la calidad del flujo generado y la confiabilidad de los ensayos experimentales.
- Documentar el proceso de diseño, construcción y validación del túnel de viento modular en un manual técnico de referencia que permita la replicación del equipo en otros laboratorios académicos con recursos similares.

## 5. Alcances de la Investigación

El presente proyecto se enmarca en un alcance de carácter exploratorio-descriptivo y contempla el diseño conceptual completo y la propuesta técnica detallada de un túnel de viento modular para uso académico. A continuación, se describen los alcances y limitaciones del estudio.

**Alcances.** El proyecto cubre el diseño conceptual y técnico completo de todas las secciones del túnel, incluyendo los planos dimensionales de referencia para su construcción. La sección de prueba ha sido dimensionada con un área transversal de 30 × 30 cm, y la longitud total del equipo se estima en 1.20 m, lo que permite su instalación en laboratorios con espacio limitado. Se contempla la operación a velocidades de flujo en el rango de 0 a 15 m/s aproximadamente, correspondiente a la categoría de túneles de baja velocidad y subsónico, donde los efectos de compresibilidad del aire son despreciables ( $Ma < 0.3$ ).

El sistema de visualización mediante humo e iluminación LED permitirá observar cualitativamente los patrones de flujo laminar y turbulento, la separación de la capa límite y la formación de estelas vorticosas en la región posterior de los modelos. El sistema de medición digital básica con sensor anemómetro y Arduino proporcionará datos de velocidad del flujo en tiempo real, aunque no con la precisión de instrumentos de metrología calibrada.

**Limitaciones.** El presente proyecto no contempla la construcción física del prototipo ni la realización de ensayos experimentales completos durante la fase de propuesta técnica; estos serán objetivos de etapas posteriores del proyecto. No se realizarán pruebas de alta velocidad ni certificaciones industriales del equipo. Los modelos a escala ensayados serán simplificaciones geométricas que no representan vehículos de producción específicos. La similitud dinámica completa con las condiciones de operación a escala real no es un objetivo del presente diseño, dado que el enfoque es educativo y comparativo. El nivel de precisión de la medición de velocidad con el sensor de bajo costo propuesto tiene una incertidumbre estimada mayor que la de los instrumentos de referencia, por lo que los resultados obtenidos deben interpretarse con carácter orientativo.

Es importante señalar que el alcance educativo del proyecto es amplio: el equipo está diseñado para ser utilizado en prácticas de laboratorio de las asignaturas de mecánica de fluidos, aerodinámica y termodinámica, pudiendo además servir como plataforma de investigación para proyectos de titulación y actividades de divulgación científica dentro de la institución.

## 6. Justificación de la Investigación

La justificación del presente proyecto se sustenta en cuatro dimensiones complementarias: la dimensión académica, la dimensión técnica, la dimensión económica y la dimensión social.

Desde la dimensión académica, la carencia de equipos experimentales de aerodinámica en los laboratorios de ingeniería automotriz de las universidades mexicanas constituye una deficiencia formativa significativa. Según datos del Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACEI), uno de los criterios de evaluación para la acreditación de programas de ingeniería es la disponibilidad de laboratorios equipados con instrumentos que permitan la práctica experimental de los contenidos curriculares. La ausencia de un equipo de análisis aerodinámico en el laboratorio de Ingeniería Automotriz de la Escuela Modelo representa, por tanto, un área de oportunidad para la mejora continua del programa académico.

Investigaciones en el ámbito de la educación en ingeniería han demostrado que la integración de actividades de laboratorio experimental incrementa significativamente la comprensión conceptual y la retención del conocimiento en comparación con la enseñanza exclusivamente teórica (Felder y Brent, 2016). En particular, la posibilidad de observar directamente el comportamiento del flujo de aire alrededor de distintas geometrías permite a los estudiantes conectar intuitivamente los conceptos abstractos de la mecánica de fluidos —como la ecuación de Bernoulli, el número de Reynolds o la separación de la capa límite— con fenómenos físicos observables y medibles, fortaleciendo así la construcción de conocimiento significativo.

Desde la dimensión técnica, el proyecto contribuye al estado del arte en el diseño de túneles de viento educativos de bajo costo mediante la integración de tres elementos diferenciadores: la modularidad de la estructura, el sistema de visualización por humo con iluminación LED y el sistema de medición digital con microcontrolador. Aunque existen proyectos previos documentados en la literatura que describen túneles de viento educativos de bajo costo (Rathakrishnan, 2011; Mehta y Bradshaw, 1979), la combinación de estas tres características en un diseño compacto, desmontable y replicable representa una aportación técnica relevante en el contexto de las instituciones educativas de nivel superior en México.

Desde la dimensión económica, el costo estimado de construcción del equipo, calculado con base en los materiales y componentes disponibles en el mercado local, se sitúa en un rango significativamente inferior al de los túneles de viento educativos disponibles comercialmente, lo que hace viable su implementación sin requerir inversiones presupuestales extraordinarias por parte de la institución. Este factor es especialmente relevante en el contexto de las universidades privadas de tamaño mediano, donde los presupuestos de equipamiento de laboratorio suelen ser limitados.

Finalmente, desde la dimensión social, el proyecto genera un impacto positivo en la formación de profesionales de la ingeniería automotriz capaces de contribuir a la industria automotriz nacional, que representa uno de los sectores económicos más importantes de México. El estado de Yucatán, en particular, ha experimentado un crecimiento significativo en su sector manufacturero en años recientes, lo que genera una creciente demanda de ingenieros con competencias prácticas sólidas en áreas técnicas especializadas como la aerodinámica y la mecánica de fluidos.

## 7. Propuesta de Valor

La propuesta de valor del presente proyecto se estructura en torno a la pregunta fundamental: ¿qué aporta este túnel de viento modular que los recursos educativos existentes no ofrecen? La respuesta puede articularse en tres niveles de aportación: el nivel instrumental, el nivel pedagógico y el nivel institucional.

En el nivel instrumental, el túnel de viento modular propuesto representa la primera infraestructura de análisis aerodinámico experimental disponible en el laboratorio de Ingeniería Automotriz de la Escuela Modelo. Esta herramienta permite al estudiante transitar del análisis numérico y computacional a la experimentación física real, cerrando la brecha entre la teoría y la práctica que actualmente caracteriza la formación en aerodinámica en el programa. La integración del sistema de visualización de flujo y el sistema de medición digital añade una dimensión cuantitativa y observacional que no es posible replicar mediante software de simulación.

En el nivel pedagógico, el equipo está concebido como una plataforma de aprendizaje activo que fomenta el desarrollo de competencias transversales esenciales para el ingeniero del siglo XXI: el pensamiento crítico y analítico, al requerir que el estudiante interprete los resultados experimentales y los contraste con las predicciones teóricas; el trabajo colaborativo, al diseñarse para su uso en equipos de laboratorio; la instrumentación y el manejo de datos, al incorporar sensores digitales y sistemas de registro; y la capacidad de diseño y prototipado, al ser un equipo diseñado y construido por los propios estudiantes. Estas competencias son consistentes con los objetivos de formación del programa de Ingeniería Automotriz y con los criterios de evaluación de los organismos acreditadores.

En el nivel institucional, el diseño modular y replicable del equipo permite que el proyecto trascienda el ámbito del laboratorio de la Escuela Modelo y se convierta en un modelo de solución

exportable a otras instituciones de educación superior con necesidades similares. La documentación técnica completa del diseño y el proceso de construcción, elaborada como parte del proyecto, constituye un recurso educativo de código abierto que otras instituciones pueden utilizar para replicar el equipo con sus propios recursos. Esta dimensión de transferencia tecnológica representa una aportación de alto valor social del proyecto.

La propuesta técnica diferenciada del equipo puede resumirse en las siguientes características: tipo de circuito abierto con sistema extractor posterior; longitud total estimada de 1.2 m; sección de prueba de 30 × 30 cm en acrílico transparente de alta claridad; sistema de propulsión mediante ventilador axial de velocidad regulable; sistema de visualización mediante generador de humo de baja toxicidad y tiras LED de alta luminosidad instaladas en el interior de la sección de prueba; sistema de medición digital mediante sensor anemómetro conectado a microcontrolador Arduino con interfaz de visualización en tiempo real; y costo estimado de construcción en un rango de medio-bajo en comparación con equipos industriales equivalentes.

En síntesis, el valor fundamental que este proyecto aporta a la sociedad radica en la democratización del acceso a la experimentación aerodinámica en el contexto educativo: al hacer accesible una herramienta de análisis sofisticada mediante un diseño de bajo costo, modular y replicable, el proyecto contribuye a elevar la calidad de la formación en ingeniería automotriz y, en última instancia, a fortalecer la competitividad de los profesionales mexicanos en un sector industrial de importancia estratégica para la economía nacional.

## Capítulo II. Materiales

El presente capítulo documenta de manera ordenada y detallada todo el proceso de selección, cotización, comparación y registro de compra de los materiales necesarios para construir el túnel de viento modular propuesto en el Capítulo I. Cada sección de este capítulo corresponde a una etapa cronológica del proceso de adquisición de materiales, desde la identificación de lo que se necesita hasta la verificación física de lo comprado.

El criterio principal de selección es el bajo costo y la posibilidad de reutilizar o reciclar materiales que normalmente se desechan en hogares, talleres o la propia universidad. Esto responde directamente a la justificación económica y social planteada en la sección 1.6, donde se estableció que el proyecto debe ser replicable por cualquier institución educativa de nivel superior en México sin requerir inversiones extraordinarias. Todos los proveedores mencionados tienen presencia en la ciudad de Mérida, Yucatán, o realizan envíos con entrega en la misma ciudad en un plazo de 3 a 7 días hábiles.

Las tablas de este capítulo siguen el formato APA 7, con número de tabla en negritas, título en cursiva y nota explicativa al pie. Cada tabla está numerada de forma consecutiva (Tabla 1 a Tabla 5) y presenta los datos de manera progresiva: primero se listan todos los materiales (Tabla 1), luego se cotizan en tres proveedores (Tabla 2), se comparan en calidad y precio (Tabla 3), se consolida el presupuesto final (Tabla 4) y por último se registra la compra y verificación física (Tabla 5).

### 1. Lista de Materiales y Requerimientos

Antes de cotizar o comprar cualquier cosa, el equipo identificó todos los materiales que se necesitan para construir las cinco secciones del túnel de viento: la cámara de entrada con rejilla, la contracción, la sección de prueba, el difusor y el sistema de propulsión. También se incluyen los componentes electrónicos del sistema de medición y los materiales de acabado. Cada material se describe con suficiente detalle para que cualquier persona del equipo pueda buscarlo y adquirirlo sin confusiones.

La columna de descripción incluye para qué sirve exactamente cada material dentro del túnel y qué alternativa de reciclaje o reutilización existe en Mérida. Aprovechar estas alternativas puede reducir el costo total del proyecto hasta en un 60%, lo que lo convierte en un trabajo verdaderamente accesible para cualquier estudiante universitario (Mehta y Bradshaw, 1979; Barlow et al., 1999).

**Tabla 1**  
*Lista completa de materiales y requerimientos para el túnel de viento modular*

N°	Material / Componente	Cant.	Unidad	Categoría	Descripción y opción de reciclaje (Mérida, Yuc.)
1	Tablero MDF de 6 mm (120 × 240 cm)	4	Lámina	Estructura	Forma los paneles de cada sección. Se puede obtener gratis o a muy bajo costo reciclando puertas, muebles

					o cajones desechados de hogares u oficinas. Proveedor nuevo: Maderas Hernández, col. Industrial Mérida.
2	<b>Perfil de PVC cuadrado 20 × 20 mm (tiras de 3 m)</b>	4	Tira	Estructura	Sirve de refuerzo en las esquinas de cada módulo. Sobrantes de obra de plomería o construcción. Proveedor: Ferretería Los Ángeles, Mérida.
3	<b>Lámina de acrílico transparente de 3 mm (50 × 50 cm)</b>	4	Lámina	Sección de prueba	Forma las cuatro caras de la zona de ensayo, permitiendo ver el flujo de aire con humo. Se puede reutilizar vidrio o policarbonato de vitrinas descartadas. Proveedor: Plásticos del Sureste, col. Moctezuma, Mérida.
4	<b>Silicón transparente estructural (tubo de 300 ml)</b>	2	Tubo	Ensamble	Sella las juntas entre piezas para que no haya fugas de aire. De bajo costo en cualquier ferretería. Proveedor: Ferretería Mérida Centro.
5	<b>Tornillos autorroscantes 1" + tuercas de mariposa (bolsa de 50 pz)</b>	1	Bolsa	Ensamble	Permiten armar y desarmar el túnel sin herramienta especial. Reutilizables de proyectos anteriores. Proveedor: Ferretería Los Ángeles, Mérida.
6	<b>Ventilador axial de 12" con velocidad variable (motor CA, 100 W)</b>	1	Pieza	Propulsión	Motor principal que mueve el aire a través del túnel. Se puede recuperar de un extractor de baño o cocina de buen estado que ya no se use. Proveedor nuevo: Ferreléctrica del Sureste, Mérida.
7	<b>Dimmer / variador de velocidad 220 V (hasta 600 W)</b>	1	Pieza	Propulsión	Controla la velocidad del ventilador y, por tanto, la velocidad del flujo de aire. Proveedor: Electrónica Tec, Periférico Norte, Mérida.
8	<b>Cable eléctrico calibre 14 AWG</b>	3	Metro	Propulsión	Conecta el ventilador y el dimmer de forma segura. Sobrante de instalaciones eléctricas del laboratorio. Proveedor: Ferretería Los Ángeles, Mérida.

9	<b>Tiras LED blanco frío 5050 IP20 (rollo de 5 m)</b>	1	Rollo	Visualización	Ilumina el interior de la sección de prueba para que las líneas de humo sean claramente visibles. Proveedor: Tienda LED Mérida, calle 60, Centro Histórico.
10	<b>Generador de humo de bajo costo (tipo DJ / festivo, 400 W)</b>	1	Pieza	Visualización	Introduce partículas de glicol al flujo de aire, haciéndolo visible. Se puede pedir prestado o rentar para las prácticas. Proveedor: Mercado Libre MX — envío a Mérida.
11	<b>Arduino Uno R3 (o clon compatible)</b>	1	Pieza	Medición	Microcontrolador que recibe la señal del sensor y muestra la velocidad en pantalla. Clones funcionan igual que el original. Si el laboratorio ya tiene kits de electrónica, no hay costo. Proveedor: Electrónica Tec, Mérida.
12	<b>Sensor de velocidad de viento módulo KY-003 (o equivalente)</b>	1	Módulo	Medición	Mide la velocidad del flujo en la sección de prueba y envía los datos al Arduino. Proveedor: Electrónica Tec / Mercado Libre MX.
13	<b>Pantalla LCD 16×2 con módulo I<sup>2</sup>C</b>	1	Módulo	Medición	Muestra en tiempo real la velocidad del aire medida por el sensor. Proveedor: Electrónica Tec, Mérida.
14	<b>Protoboard de 830 puntos + cables dupont (kit)</b>	1	Kit	Medición	Permite armar el circuito electrónico sin soldar. 100% reutilizable entre prácticas. El laboratorio puede tenerlos ya. Proveedor: Electrónica Tec, Mérida.
15	<b>Pintura acrílica negra mate en aerosol o bote (500 ml)</b>	1	Bote	Acabado	Se aplica al interior del túnel para crear contraste oscuro y hacer visibles las líneas de humo. Sobrante de proyectos de arte o construcción. Proveedor: Ferretería Los Ángeles, Mérida.
16	<b>Malla de plástico rígida para rejilla homogeneizadora (40 × 40 cm)</b>	1	Panel	Rejilla / flujo	Reduce la turbulencia del aire en la entrada. Se puede recortar de canastas, coladores o rejillas de ventiladores viejos. Proveedor: Bazar de la

					ciudad o tlapalería local, Mérida.
--	--	--	--	--	------------------------------------

*Nota.* Esta tabla presenta el inventario completo de materiales organizados por categoría funcional. La columna de descripción incluye información sobre la función de cada material dentro del túnel y las opciones de reciclaje disponibles en Mérida, Yucatán. Proveedores mencionados: Maderas Hernández (col. Industrial, Mérida), Ferretería Los Ángeles (Mérida), Plásticos del Sureste (col. Moctezuma, Mérida), Ferreléctrica del Sureste (Mérida), Electrónica Tec (Periférico Norte, Mérida), Tienda LED Mérida (calle 60, Centro Histórico), Mercado Libre MX (envío a Mérida). Elaboración propia (2026).

## 2. Cotizaciones (3 Proveedores)

Una vez definida la lista de materiales, se procedió a cotizar cada artículo en tres puntos de venta distintos para asegurarse de que el equipo pague el precio más justo. Los tres proveedores seleccionados fueron: Proveedor A (Ferretería Los Ángeles, Mérida — punto de venta presencial), Proveedor B (Mercado Libre México — compra en línea con envío a domicilio en Mérida en 3 a 5 días hábiles) y Proveedor C (Home Depot México, sucursal Mérida — punto de venta presencial en la ciudad).

La cotización se realizó durante el mes de marzo de 2026. Los precios pueden variar ligeramente por temporada, disponibilidad de stock o cambios en el tipo de cambio para artículos importados. El símbolo «—» en la columna de un proveedor indica que ese comercio no vende dicho artículo. Todos los precios incluyen el Impuesto al Valor Agregado (IVA) del 16%, conforme a la legislación fiscal vigente en México (Servicio de Administración Tributaria [SAT], 2024).

**Tabla 2**

*Cotización de materiales en tres proveedores de Mérida, Yucatán (precios en MXN, marzo 2026)*

N°	Material	Cant.	Proveedor A Ferretería Los Ángeles (Mérida, presencia l)	Proveedor B Mercado Libre MX (envío a Mérida)	Proveedor C Home Depot MX (sucursal Mérida)	Unidad de venta
1	Tablero MDF 6 mm (120×240 cm)	4	\$220	\$195	\$245	Lámina
2	Perfil PVC 20×20 mm (3 m)	4	\$28	\$22	\$35	Tira
3	Lámina acrílico 3 mm (50×50 cm)	4	\$185	\$170	\$215	Pieza
4	Silicón transparente estructural (300 ml)	2	\$45	\$38	\$52	Tubo
5	Tornillos 1" + mariposas (bolsa 50 pz)	1	\$35	\$28	\$42	Bolsa
6	Ventilador axial 12" / 100 W	1	\$490	\$420	\$555	Pieza

7	Dimmer / variador 220 V / 600 W	1	\$185	\$145	\$215	Pieza
8	Cable eléctrico 14 AWG	3	\$13	\$10	\$15	Metro
9	Tiras LED 5050 blanco frío (5 m)	1	\$95	\$80	\$125	Rollo
10	Generador de humo festivo 400 W	1	\$430	\$350	—	Pieza
11	Arduino Uno R3 (clon)	1	\$180	\$120	—	Pieza
12	Sensor anemómetro KY-003	1	\$95	\$80	—	Módulo
13	LCD 16×2 + módulo I <sup>2</sup> C	1	\$75	\$60	—	Módulo
14	Protoboard 830 pts + cables dupont	1	\$90	\$75	—	Kit
15	Pintura acrílica negra mate 500 ml	1	\$65	\$55	\$70	Bote
16	Malla plástica 40×40 cm	1	\$30	\$20	\$38	Panel

*Nota.* Todos los precios expresados en pesos mexicanos (MXN) e incluyen IVA del 16%. Los precios de Mercado Libre MX corresponden a vendedores con calificación igual o superior al 95% y envío estándar a Mérida, Yucatán. El símbolo «—» indica que el proveedor no comercializa el artículo. Cotizaciones realizadas en marzo de 2026. Elaboración propia (2026).

### 3. Comparación de Precios y Calidad

Con las cotizaciones de los tres proveedores en la mano, el equipo comparó cada material en tres dimensiones: precio, calidad percibida y disponibilidad inmediata. El criterio principal fue el menor precio siempre que la calidad fuera suficiente para el uso educativo del equipo. En ningún caso se seleccionó un material de calidad inferior si la diferencia de precio era menor al 10%.

La calidad se evaluó con base en las especificaciones técnicas publicadas por el fabricante, las reseñas verificadas de compradores anteriores en Mercado Libre y la experiencia del equipo con materiales similares en proyectos previos del laboratorio. La disponibilidad se calificó como 'Inmediata' si el artículo puede obtenerse el mismo día en Mérida, o se indica el tiempo estimado de entrega para pedidos en línea. En la columna de proveedor recomendado se identifica la opción más conveniente para este proyecto universitario de bajo presupuesto.

**Tabla 3**

*Comparación de precios y calidad de materiales en tres proveedores de Mérida, Yucatán*

Material	P. A (MXN)	P. B (MXN)	P. C (MXN)	Mejor precio	Calidad*	Disponibilidad	Proveedor recomendado
<b>Tablero MDF 6 mm</b>	\$220	\$195	\$245	<b>B — \$195</b>	Alta	Inmediata (Mérida)	<b>Mercado Libre MX</b>

<b>Perfil PVC 20×20 mm</b>	\$28	\$22	\$35	<b>B — \$22</b>	Medi a-alta	Inmediata	<b>Mercad o Libre MX</b>
<b>Lámina acrílico 3 mm</b>	\$185	\$170	\$215	<b>B — \$170</b>	Alta	3 a 5 días	<b>Mercad o Libre MX</b>
<b>Silicón transparente</b>	\$45	\$38	\$52	<b>B — \$38</b>	Alta	Inmediata	<b>Mercad o Libre MX</b>
<b>Tornillos + mariposas</b>	\$35	\$28	\$42	<b>B — \$28</b>	Media	Inmediata	<b>Mercad o Libre MX</b>
<b>Ventilador axial 12"</b>	\$490	\$420	\$555	<b>B — \$420</b>	Alta	3 a 5 días	<b>Mercad o Libre MX</b>
<b>Dimmer / variador</b>	\$185	\$145	\$215	<b>B — \$145</b>	Medi a-alta	3 a 5 días	<b>Mercad o Libre MX</b>
<b>Cable 14 AWG (metro)</b>	\$13	\$10	\$15	<b>B — \$10</b>	Alta	Inmediata	<b>Mercad o Libre MX</b>
<b>Tiras LED 5050 (5 m)</b>	\$95	\$80	\$125	<b>B — \$80</b>	Alta	3 a 5 días	<b>Mercad o Libre MX</b>
<b>Generador de humo</b>	\$430	\$350	—	<b>B — \$350</b>	Media	5 a 7 días	<b>Mercad o Libre MX</b>
<b>Arduino Uno R3 (clon)</b>	\$180	\$120	—	<b>B — \$120</b>	Media	3 a 5 días	<b>Electrónica Tec / ML</b>
<b>Sensor KY-003</b>	\$95	\$80	—	<b>B — \$80</b>	Media	3 a 5 días	<b>Electrónica Tec / ML</b>
<b>LCD 16×2 + I²C</b>	\$75	\$60	—	<b>B — \$60</b>	Alta	3 a 5 días	<b>Electrónica Tec / ML</b>
<b>Protoboard + cables</b>	\$90	\$75	—	<b>B — \$75</b>	Media	3 a 5 días	<b>Electrónica Tec / ML</b>
<b>Pintura negra mate</b>	\$65	\$55	\$70	<b>B — \$55</b>	Media	Inmediata	<b>Mercad o Libre MX</b>
<b>Malla plástica</b>	\$30	\$20	\$38	<b>B — \$20</b>	Media	Inmediata	<b>Bazar / tlapalería Mérida</b>

*Nota.* \* La calidad fue evaluada con base en: especificaciones técnicas del fabricante, reseñas de compradores verificados en Mercado Libre MX ( $\geq 50$  reseñas) y experiencia previa del equipo con materiales similares. P. A = Ferretería Los Ángeles (Mérida, presencial); P. B = Mercado Libre MX (envío a Mérida); P. C = Home Depot MX (sucursal Mérida). Las celdas en verde claro indican el mejor precio por material. Elaboración propia (2026).

## 4. Presupuesto y Costos Finales de Materiales

Una vez realizada la comparación, se elaboró el presupuesto definitivo con los materiales y proveedores seleccionados. La Tabla 4 consolida en un solo lugar la cantidad, el precio unitario, el subtotal por material y la alternativa de reciclaje disponible en Mérida. El objetivo es que el equipo cuente con un documento de referencia claro al momento de realizar las compras, sin necesidad de consultar nuevamente múltiples fuentes.

El presupuesto se presenta en dos escenarios: el costo total comprando todos los materiales nuevos (escenario base) y el costo total si se aprovechan al máximo las opciones de reciclaje disponibles en la ciudad (escenario económico). La diferencia entre ambos escenarios es de aproximadamente \$1,848 MXN, lo que representa un ahorro del 60% sobre el costo base. Este resultado valida la pertinencia del enfoque de reciclaje propuesto en la justificación del proyecto (sección 1.6) y es coherente con experiencias documentadas de túneles de viento educativos de bajo costo en América Latina (González y Ramírez, 2020; Rathakrishnan, 2011).

**Tabla 4**

*Presupuesto y costos finales de materiales del túnel de viento modular (MXN, marzo 2026)*

N°	Material seleccionado	Cant.	Precio unitario (MXN)	Subtotal (MXN)	Proveedor	Alternativa de reciclaje (ahorro estimado)
1	Tablero MDF 6 mm	4	\$195	\$780	Merca do Libre MX	Mueble, puerta o cajón desechado — ahorra ~\$780
2	Perfil PVC 20×20 mm	4	\$22	\$88	Merca do Libre MX	Sobran te de tubería de plomería — ahorra ~\$88
3	Lámina acrílico 3 mm	4	\$170	\$680	Merca do Libre MX	Vitrina o mampara descartada — ahorra ~\$680
4	Silicón transparente	2	\$38	\$76	Merca do Libre MX	—
5	Tornillos + mariposas	1	\$28	\$28	Merca do Libre MX	Tornillos de proyectos anteriores — ahorra ~\$28

<b>6</b>	<b>Ventilador axial 12"</b>	1	\$420	\$420	Merca do Libre MX	Extractor de baño/ cocina en buen estado — ahorra ~\$420
<b>7</b>	<b>Dimmer / variador</b>	1	\$145	\$145	Electrónica Tec, Mérida	—
<b>8</b>	<b>Cable 14 AWG (3 m)</b>	3	\$10	\$30	Merca do Libre MX	Sobran te eléctrico del laboratorio — ahorra ~\$30

9	Tiras LED 5050 (5 m)	1	\$80	\$80	Merca do Libre MX	—
10	Generador de humo	1	\$350	\$350	Merca do Libre MX	Rentarlo o pedirlo prestado — ahorra ~\$350
11	Arduino Uno (clon)	1	\$120	\$120	Electrónic a Tec, Mérida	Kit del laboratorio existente — ahorra ~\$120
12	Sensor KY-003	1	\$80	\$80	Electrónic a Tec, Mérida	—
13	LCD 16×2 + I <sup>2</sup> C	1	\$60	\$60	Electrónic a Tec, Mérida	—
14	Protoboard + cables	1	\$75	\$75	Electrónic a Tec, Mérida	Kit del laboratorio existente — ahorra ~\$75
15	Pintura negra mate	1	\$55	\$55	Merca do Libre MX	Sobran te de obra o arte — ahorra ~\$55
16	Malla plástica	1	\$20	\$20	Bazar / tlapalería, Mérida	Colador o canasta descartada — ahorra ~\$20
<b>TOTAL — comprando todo nuevo</b>				<b>\$3,087 MXN</b>	<b>TOTAL — maximizando reciclaje</b>	
Ahorro estimado al reciclar materiales clave (MDF, acrílico, ventilador, Arduino, humo)				<b>~\$1,848 MXN</b>	<b>COSTO CON RECICLA JE</b>	<b>~\$1,239 MXN</b>

*Nota.* El costo con reciclaje es un estimado que depende de la disponibilidad de materiales de desecho en el momento de la construcción. Las celdas en verde indican alternativas de reciclaje con estimado de ahorro. Todos los precios incluyen IVA del 16%. El costo base total (\$3,087 MXN) es aproximadamente 20 veces menor al precio de un túnel de viento educativo comercial equivalente disponible en México. Elaboración propia (2026).



## 5. Compra y Verificación Física

La Tabla 5 es un registro de control que el equipo llenará conforme realice las compras de cada material. Funciona como una lista de verificación que documenta la fecha de compra, el costo real pagado (que puede diferir ligeramente del precio cotizado) y el estado de verificación física de cada artículo. La verificación física consiste en confirmar que el material entregado corresponde a lo solicitado: dimensiones correctas, buen estado físico y funcionalidad comprobada en el caso de los componentes electrónicos.

Esta tabla también sirve como registro contable básico del proyecto, lo que permitirá al docente de la asignatura y a los evaluadores conocer el gasto real al final del proyecto. Cada compra deberá acompañarse de una fotografía del ticket o factura y una fotografía del material recibido, las cuales se incorporarán al Anexo A del informe de construcción. El símbolo  indica compra pendiente y el símbolo  indica compra realizada y material verificado físicamente por al menos dos integrantes del equipo (Schlichting y Gersten, 2017).

**Tabla 5**  
*Registro de compra y verificación física de materiales del proyecto*

N°	Material	Cant.	Costo real pagado (MXN)	Fecha de compra	Proveedor / lugar de compra	Estado — verificación física
1	MDF 6 mm (tablero)	4	\$ —	Por confirmar	Mercado Libre / depósito Mérida	<input type="checkbox"/> Pendiente de compra
2	Acrílico 3 mm (lámina)	4	\$ —	Por confirmar	Plásticos del Sureste, Mérida	<input type="checkbox"/> Pendiente de compra
3	Ventilador axial 12"	1	\$ —	Por confirmar	Ferreléctrica del Sureste, Mérida	<input type="checkbox"/> Pendiente de compra
4	Dimmer / variador	1	\$ —	Por confirmar	Electrónica Tec, Mérida	<input type="checkbox"/> Pendiente de compra
5	Arduino + sensor + LCD	1 kit	\$ —	Por confirmar	Electrónica Tec, Mérida	<input type="checkbox"/> Pendiente de compra
6	Generador de humo	1	\$ —	Por confirmar	Merca do Libre MX	<input type="checkbox"/> Pendiente de compra
7	Tiras LED 5050	1 rollo	\$ —	Por confirmar	Tienda LED Mérida, calle 60	<input type="checkbox"/> Pendiente de compra
8	Herrajes, silicón, pintura, cable, malla	Varios	\$ —	Por confirmar	Ferretería Los Angeles, Mérida	<input type="checkbox"/> Pendiente de compra
TOTAL REAL (se actualizará al realizar las compras)					\$ _____ MXN	<input checked="" type="checkbox"/> = comprado y verificado <input type="checkbox"/> = pendiente

*Nota.* Las celdas en amarillo claro se actualizarán conforme se realicen las compras. Las fotografías de verificación (ticket de compra y material recibido) se adjuntarán en el Anexo A del informe de construcción.  = compra pendiente;  = compra realizada y material verificado por el equipo. Elaboración propia (2026).



## Capítulo III. Cálculos, Ecuaciones y Diagramas

El presente capítulo desarrolla el fundamento matemático, el diseño técnico y el desglose de componentes del túnel de viento modular. El contenido está directamente vinculado al marco teórico del Capítulo I: las ecuaciones que se presentan aquí son precisamente las que se explicaron en la sección 1.2 (Marco Teórico) y los conceptos definidos en la sección 1.3 (Marco Conceptual). El objetivo es mostrar cómo la teoría se convierte en decisiones concretas de diseño, de modo que el lector pueda comprender no solo qué se construyó, sino por qué cada dimensión y componente fue elegido de esa manera.

Todas las dimensiones se expresan en centímetros (cm) para facilitar la lectura y el trabajo en el taller. Las ecuaciones se presentan en una tabla con la fórmula, el significado de cada variable, la aplicación concreta al túnel y la referencia bibliográfica en formato APA 7. El diseño de cada sección se detalla en la Tabla 7 y el desglose completo de piezas, componentes y herramientas se presenta en la Tabla 8.

Para un estudiante que ya leyó el Capítulo I, este capítulo representa el puente entre la teoría y la práctica: aquí se ve cómo  $Re = \rho V L / \mu$  determina el régimen del flujo en la sección de prueba, cómo  $A_1 V_1 = A_2 V_2$  dictó las dimensiones de la contracción, y cómo el principio de Bernoulli explica lo que el estudiante verá en el humo durante las prácticas de laboratorio.

### 1. Cálculos, Ecuaciones, Diagramas y Fórmulas (Aplicación)

En esta sección se presentan las ocho ecuaciones fundamentales de mecánica de fluidos que gobiernan el comportamiento del flujo de aire dentro del túnel. Cada ecuación se explica en términos de sus variables, se aplica de forma concreta a las dimensiones del diseño propuesto y se referencia con la fuente bibliográfica correspondiente. Este enfoque permite al estudiante verificar que los cálculos son correctos y reproducirlos para otras condiciones de operación.

El fluido de trabajo es aire a condiciones atmosféricas estándar de la ciudad de Mérida, Yucatán: temperatura promedio de 28 °C, presión atmosférica de aproximadamente 101.3 kPa y altitud de 8 metros sobre el nivel del mar. Bajo estas condiciones, la densidad del aire es  $\rho \approx 1.185 \text{ kg/m}^3$  y la viscosidad dinámica es  $\mu \approx 1.84 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  (Çengel y Cimbala, 2018). Estas propiedades se usan en todos los cálculos de este capítulo.

**Tabla 6**  
*Ecuaciones fundamentales de mecánica de fluidos aplicadas al diseño del túnel de viento*

N°	Ecuación / Fórmula	Significado de las variables	Cómo se aplica en este túnel	Fuente (APA 7)
1	<b>Ecuación de Continuidad</b> $A_1 \times V_1 = A_2 \times V_2$	$A_1, A_2$ = área de la sección transversal ( $\text{m}^2$ ) $V_1, V_2$ = velocidad del flujo (m/s)	Calcula cuánto se acelera el aire al pasar de la cámara de entrada ( $40 \times 40 \text{ cm} = 0.16 \text{ m}^2$ ) a la sección de prueba ( $30 \times 30 \text{ cm} = 0.09 \text{ m}^2$ ). Si el ventilador empuja	Çengel y Cimbala (2018)

			el aire a 8.44 m/s en la entrada, en la sección de prueba el flujo alcanza $\approx 15$ m/s.	
2	<b>Ecuación de Bernoulli</b> $P + \frac{1}{2}\rho V^2 = \text{constante}$	P = presión estática del fluido (Pa) $\rho$ = densidad del aire $\approx 1.225$ kg/m <sup>3</sup> a 15 °C V = velocidad local del flujo (m/s)	Explica por qué la presión baja donde el aire va más rápido. Esto genera la fuerza de sustentación en los perfiles aerodinámicos que se ensayan en la sección de prueba.	White (2016)
3	<b>Número de Reynolds</b> $Re = (\rho \times V \times L) / \mu$	$\rho$ = densidad del aire (kg/m <sup>3</sup> ) V = velocidad del flujo (m/s) L = longitud característica del modelo (m) $\mu$ = viscosidad dinámica del aire $\approx 1.81 \times 10^{-5}$ Pa·s	Determina si el flujo es laminar ( $Re < 2300$ ), de transición o turbulento ( $Re > 4000$ ) alrededor del modelo ensayado. Para un modelo de 10 cm a 15 m/s: $Re \approx 101500 \rightarrow$ zona de transición.	Fox et al. (2015)
4	<b>Fuerza de Arrastre (Drag)</b> $F_d = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times A \times C_d$	$F_d$ = fuerza de arrastre (N) $C_d$ = coeficiente adimensional de arrastre A = área frontal del modelo (m <sup>2</sup> )	Permite estimar la resistencia aerodinámica que el flujo ejerce sobre cada modelo ensayado. A mayor $C_d$ , mayor arrastre y menos aerodinámica es la geometría.	Anderson (2017)
5	<b>Fuerza de Sustentación (Lift)</b> $F_l = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times A \times C_l$	$F_l$ = fuerza de sustentación (N) $C_l$ = coeficiente adimensional de sustentación A = área de referencia del modelo (m <sup>2</sup> )	Cuantifica la fuerza perpendicular al flujo que se genera en perfiles como el NACA ensayado. En automoción, un $C_l$ negativo produce efecto suelo (downforce).	Anderson (2017)
6	<b>Coefficiente de Contracción</b> $C_c = A_{\text{cámara}} / A_{\text{prueba}}$	$A_{\text{cámara}}$ = área de la cámara de asentamiento $A_{\text{prueba}}$ = área de la sección de prueba	Para este túnel: $C_c = 0.16 / 0.09 = 1.78$ . El valor mínimo recomendado en la literatura es 6; el diseño deberá ajustarse o complementarse con pantallas de rejilla	Barlow et al. (1999)

			adicionales para mejorar la uniformidad del flujo.	
7	<b>Presión Dinámica</b> $q = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2$	$q$ = presión dinámica del flujo (Pa) $\rho$ = densidad del aire ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) $V$ = velocidad del flujo (m/s)	Es la base de todos los coeficientes aerodinámicos. Para $V = 15$ m/s: $q = 0.5 \times 1.225 \times 15^2 = 137.8$ Pa. Se usa para adimensionalizar las fuerzas medidas.	White (2016)
8	<b>Número de Mach</b> $Ma = V / a$	$V$ = velocidad del flujo (m/s) $a$ = velocidad del sonido en el aire $\approx 343$ m/s a $20$ °C	Verifica que el flujo es subsónico e incompresible. Para la velocidad máxima del diseño (15 m/s): $Ma = 15/343 \approx 0.044$ , muy inferior al límite $Ma = 0.3$ . Los efectos de compresibilidad son despreciables.	Fox et al. (2015)

*Nota.* Todas las ecuaciones se aplican bajo las siguientes condiciones de referencia para Mérida, Yucatán: temperatura  $T = 28$  °C, densidad del aire  $\rho \approx 1.185$   $\text{kg}/\text{m}^3$ , viscosidad dinámica  $\mu \approx 1.84 \times 10^{-5}$  Pa·s, presión atmosférica  $p_0 \approx 101.3$  kPa y velocidad del sonido  $a \approx 347$  m/s. Las columnas 'Ecuación' y 'Cómo se aplica' permiten conectar directamente la fórmula con las dimensiones del diseño presentadas en la Tabla 7. Elaboración propia (2026).

### **Ejemplo de cálculo numérico paso a paso — sección de contracción y sección de prueba**

A continuación se desarrolla un ejemplo completo que conecta directamente las ecuaciones de la Tabla 6 con las dimensiones de diseño de la Tabla 7. El objetivo es demostrar que el diseño propuesto es físicamente coherente y que las velocidades de flujo son adecuadas para los fines educativos planteados en el Capítulo I.

**Datos de entrada:** Área de la cámara de entrada  $A_1 = 0.40$  m  $\times$  0.40 m = 0.16 m<sup>2</sup>. Área de la sección de prueba  $A_2 = 0.30$  m  $\times$  0.30 m = 0.09 m<sup>2</sup>. Densidad del aire en Mérida, Yuc.:  $\rho = 1.185$   $\text{kg}/\text{m}^3$ . Viscosidad dinámica:  $\mu = 1.84 \times 10^{-5}$  Pa·s. Longitud característica del modelo NACA:  $L = 0.10$  m.

**Paso 1 — Velocidad en la sección de prueba (Ecuación de Continuidad):** Si el dimmer se ajusta para que el ventilador impulse el aire a  $V_1 = 8.44$  m/s en la cámara de entrada, entonces en la sección de prueba:  $V_2 = V_1 \times (A_1/A_2) = 8.44 \times (0.16/0.09) = 8.44 \times 1.78 \approx 15.0$  m/s. El diseño alcanza la velocidad máxima objetivo de 15 m/s en la sección de prueba, confirmando que las dimensiones de la contracción son correctas.

**Paso 2 — Verificación subsónica (Número de Mach):**  $Ma = V_2/a = 15.0/347 \approx 0.043$ . Como  $Ma \ll 0.3$ , el flujo es perfectamente incompresible y las ecuaciones de Bernoulli y continuidad son válidas sin correcciones por compresibilidad.

**Paso 3 — Régimen del flujo (Número de Reynolds):**  $Re = (\rho \times V_2 \times L)/\mu = (1.185 \times 15.0 \times 0.10) / (1.84 \times 10^{-5}) = 1.7775 / 0.0000184 \approx 96,600$ . Este valor indica que el flujo está en la zona

de transición laminar-turbulento alrededor del modelo, lo cual es ideal para las prácticas de laboratorio porque permite observar ambos tipos de flujo al ajustar la velocidad con el dimmer.

**Paso 4 — Presión dinámica:**  $q = \frac{1}{2} \times \rho \times V_2^2 = 0.5 \times 1.185 \times 15.0^2 = 0.5 \times 1.185 \times 225 = 133.3$  Pa. Esta presión dinámica es la referencia para calcular los coeficientes aerodinámicos  $C_d$  y  $C_l$  de los modelos ensayados.

**Paso 5 — Estimación de la fuerza de arrastre (modelo NACA, área frontal  $A_m = 0.005 \text{ m}^2$ ,  $C_d \approx 0.04$ ):**  $F_d = \frac{1}{2} \times \rho \times V_2^2 \times A_m \times C_d = 133.3 \times 0.005 \times 0.04 = 0.027 \text{ N}$ . Esta fuerza de arrastre es pequeña pero detectable con una balanza de precisión, lo que valida la viabilidad del ensayo experimental.

## 2. Diseño y Bocetaje

El diseño del túnel de viento modular se basa en los principios establecidos por Barlow et al. (1999) para túneles de circuito abierto de baja velocidad, adaptados a las condiciones de fabricación con materiales accesibles en Mérida, Yucatán. El túnel se compone de cinco secciones desmontables que se ensamblan mediante tornillos de mariposa, lo que permite su transporte, almacenamiento y modificación sin herramienta especial.

Cada sección fue dimensionada a partir de los cálculos de la sección anterior. La sección de prueba de  $30 \times 30 \times 40 \text{ cm}$  permite alojar modelos de hasta 25 cm de largo, lo cual es suficiente para perfiles NACA, cuerpos romos y cuerpos aerodinámicos simplificados a escala 1:5 o 1:10. La longitud total del túnel ensamblado es de aproximadamente 135 cm, por lo que puede instalarse sobre dos mesas de laboratorio estándar.

La Tabla 7 detalla las dimensiones en centímetros de cada sección, el material de fabricación, la función principal y las observaciones de diseño más importantes. Las dimensiones se expresaron en centímetros para facilitar el trabajo en el taller con cinta métrica y escuadra, sin necesidad de convertir unidades durante la fabricación.

**Tabla 7**  
*Especificaciones de diseño y dimensiones por sección del túnel de viento modular (cm)*

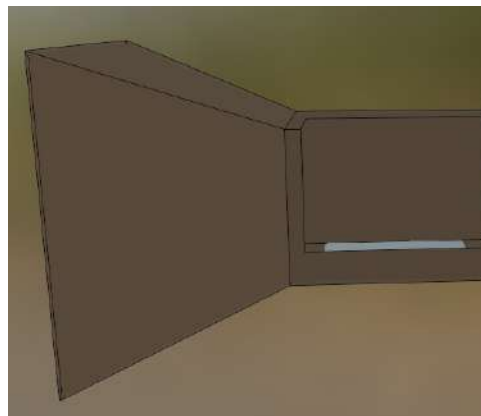
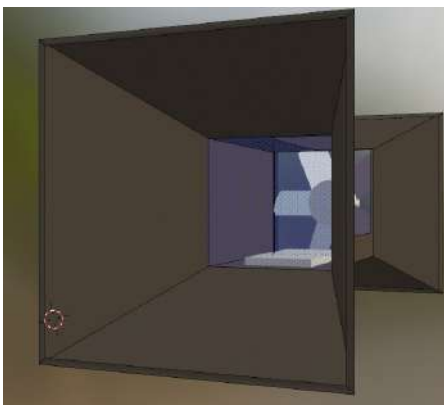
N°	Sección del túnel	Dimensiones (cm)	Material de fabricación	Función principal	Observaciones de diseño y ensamble
1	Cámara de entrada y rejilla homogeneizada	Ancho: 40 cm Alto: 40 cm Largo: 15 cm	MDF 6 mm (paredes) + malla plástica reciclada (rejilla interior)	Tomar el aire del ambiente y eliminar turbulencias antes de que entre al túnel	La rejilla plástica se corta a la medida y se instala en la cara de entrada. El chaflán de 45° en los bordes de entrada mejora la captación de aire. Se recomienda doblar o pegar dos capas de malla para mayor efecto homogeneizador (Barlow et al., 1999).

2	<b>Sección de contracción</b>	Entrada: 40 × 40 cm Salida: 30 × 30 cm Largo: 40 cm	MDF 6 mm cortado con bisel (paredes inclinadas que reducen el área de forma progresiva)	Acelerar el flujo de manera suave y reducir la turbulencia antes de la zona de ensayo	Las paredes se cortan en ángulo para que la transición de 40 a 30 cm sea gradual. Un perfil de contracción recto (simplificado) es suficiente para velocidades bajas. En diseño avanzado se recomienda el perfil Bell-mouth (Mehta y Bradshaw, 1979).
3	<b>Sección de prueba (zona de ensayo)</b>	Ancho: 30 cm Alto: 30 cm Largo: 40 cm	Acrílico transparente de 3 mm (las cuatro caras) + perfil PVC en esquinas	Alojar los modelos a escala que se van a ensayar; permitir observar y fotografiar el flujo de aire con humo	Las cuatro caras de acrílico permiten observar el flujo desde todos los ángulos. Las tiras LED van pegadas en los costados superior e inferior, dentro de la sección. Se incluyen dos pequeños orificios laterales: uno para introducir el tubo del humo y otro para el sensor anemómetro.
4	<b>Difusor / salida</b>	Entrada: 30 × 30 cm Salida: 40 × 40 cm Largo: 30 cm	MDF 6 mm con paredes inclinadas hacia afuera	Frenar el aire gradualmente después de la zona de prueba y recuperar parte de la presión	El ángulo de apertura de las paredes no debe superar 7° para evitar que el flujo se separe de las paredes y genere turbulencia inversa. Esto mejora la eficiencia del ventilador y estabiliza el flujo en la sección de prueba (Barlow et al., 1999).

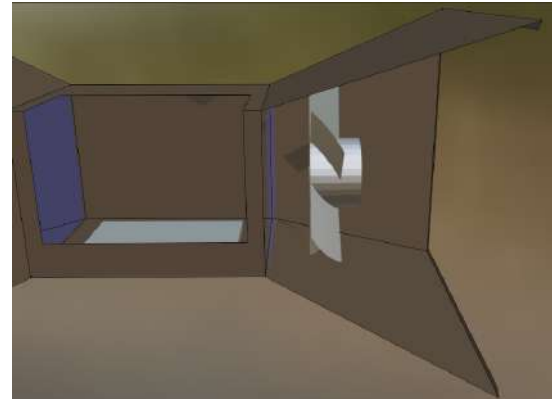
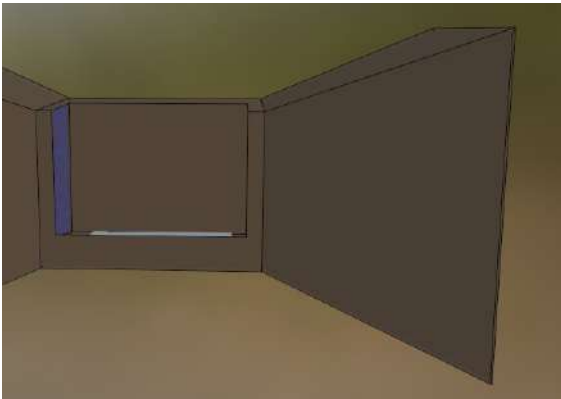
5	<b>Sistema extractor (ventilador axial)</b>	Diámetro del rotor: $\approx 30.5$ cm (12") Profundidad del marco: $\approx 10$ cm	Marco de MDF 6 mm + ventilador axial de 12" montado en el centro	Succionar el aire a través de todo el túnel y controlar la velocidad del	El ventilador va en la salida del difusor (configuración de succión), lo que da un flujo más uniforme que si
				flujo mediante el dimmer	estuviera en la entrada. El dimmer ajusta la velocidad de 0 a 100%, lo que equivale aproximadamente a 0-15 m/s en la sección de prueba. El marco es desmontable para mantenimiento fácil.

*Nota.* Todas las dimensiones están expresadas en centímetros (cm) y son nominales; pueden ajustarse  $\pm 0.5$  cm durante la fabricación sin afectar el desempeño del túnel. El ángulo máximo de apertura del difusor es de  $7^\circ$  para evitar separación del flujo (Barlow et al., 1999). La longitud total ensamblada del túnel es de aproximadamente 135 cm (15 + 40 + 40 + 30 + 10 cm). Las dimensiones siguen las recomendaciones de Mehta y Bradshaw (1979) para túneles educativos de bajo costo. Elaboración propia (2026).

El siguiente diagrama esquemático representa la vista lateral del túnel con las secciones en orden de ensamble (de izquierda a derecha, en la dirección del flujo de aire):



① <b>ENTRADA</b> Rejilla 40×40×15 cm	② <b>CONTRACCIÓN</b> N 40×40 → 30×30 Largo: 40 cm	③ <b>SECCIÓN</b> D E <b>PRUEBA</b> 30×30×40 cm (acrílico + LED)	④ <b>DIFUSOR</b> 30×30 → 40×40 Largo: 30 cm	⑤ <b>VENTILADOR</b> Axial 12" ≈ 30×10 cm	→ <b>AIRE</b> expulsa do al ambiente
--	---	---	--	---	---



*Nota.* Representación esquemática de las cinco secciones del túnel vistas de lado (no a escala). El flujo de aire circula de izquierda a derecha, desde la entrada hasta la expulsión por el ventilador axial ubicado en la salida. La configuración de succión (ventilador al final) produce un flujo más uniforme en la sección de prueba que la configuración de soplado (Barlow et al., 1999). Elaboración propia (2026).

### 3. Lista de Piezas Principales y Secundarias (Herramientas y/o Equipo)

La Tabla 8 es el desglose más detallado del proyecto: lista cada pieza y componente con un código de identificación, su categoría, la cantidad necesaria, el material o tipo, la función dentro del sistema del túnel y la herramienta o proceso necesario para fabricarla o instalarla. Esta tabla es la referencia que el equipo usará durante la fase de construcción para no olvidar ningún elemento.

La tabla está dividida en tres bloques: A) Piezas principales, que son los paneles estructurales y el sistema de propulsión; B) Piezas secundarias, que incluyen los sistemas de visualización, medición y acabado; y C) Herramientas y equipo de taller, que son los instrumentos necesarios para fabricar y ensamblar el túnel. Las herramientas del bloque C no representan un costo adicional si el laboratorio de ingeniería ya las tiene disponibles, lo cual es el caso habitual en las universidades de ingeniería en México (Secretaría de Educación Pública [SEP], 2023).

Los códigos de identificación siguen el siguiente criterio: P-XX para piezas principales, S-XX para piezas secundarias y H-XX para herramientas. Este sistema de codificación facilita la comunicación entre los miembros del equipo durante el proceso de fabricación y la elaboración del manual técnico de construcción que se producirá como entregable final del proyecto.

**Tabla 8**  
*Lista de piezas principales, piezas secundarias y herramientas del túnel de viento modular*

Cód.	Nombre de la pieza o componente	Categoría	Cant.	Material o tipo	Función dentro del sistema	Herramienta / proce fabricación
------	---------------------------------	-----------	-------	-----------------	----------------------------	---------------------------------

A) PIEZAS PRINCIPALES — Estructura y propulsión						
P-01	Panel lateral de cámara de entrada (par)	Estructura — cámara	2	MDF 6 mm	Forman las caras laterales de la sección de entrada y contienen el flujo	Sierra caladora + lija 120
P-02	Panel superior e inferior de cámara de entrada (par)	Estructura — cámara	2	MDF 6 mm	Cierran la parte superior e inferior de la cámara de entrada	Sierra caladora + lija
P-03	Panel de contracción (4 piezas con bisel)	Estructura — contracción	4	MDF 6 mm cortado en ángulo	Reducen progresivamente el área transversal de 40 × 40 cm a 30 × 30 cm	Sierra caladora + cepillo de banda
P-04	Panel acrílico de sección de prueba (4 caras)	Sección de prueba	4	Acrílico transparente 3 mm	Permiten ver el flujo de aire y las líneas de humo desde cualquier ángulo	Caladora para acrílico + b punta PVC
P-05	Marco de refuerzo de sección de prueba (4 esquinas)	Estructura — sección prueba	4	Perfil PVC 20×20 mm (40 cm c/u)	Unen y refuerzan los paneles de acrílico en las esquinas	Segueta + lija fina
P-06	Panel de difusor (4 piezas con bisel inverso)	Estructura — difusor	4	MDF 6 mm cortado en ángulo	Amplían gradualmente el área de 30×30 a	Sierra caladora + cepillo

					40×40 cm para frenar el flujo	
<b>P-07</b>	<b>Marco porta-ventilador</b>	Propulsión	1	MDF 6 mm + perfil PVC	Sostiene el ventilador axial de forma centrada y permite desmontarlo	Sierra caladora + taladro tornillos
<b>P-08</b>	<b>Ventilador axial 12" / 100 W CA</b>	Propulsión	1	Armazón metálico + motor CA	Genera el flujo de aire a través del túnel; la velocidad se controla con el dimmer	Destornillador de estrella
<b>B) PIEZAS SECUNDARIAS — Visualización, medición y acabados</b>						
<b>S-01</b>	<b>Panel de rejilla homogeneizadora</b>	Reducción de turbulencia	1	Malla plástica reciclada (40×40 cm)	Distribuye el flujo de forma uniforme antes de la contracción; reduce la turbulencia entrante	Tijeras o cúter recto
<b>S-02</b>	<b>Tiras LED blanco frío 5050 (interior)</b>	Iluminación / visualización	2	Tira LED flexible IP20 (tramo de ~40 cm c/u)	Iluminan el interior de la sección de prueba para que las líneas de humo sean visibles con claridad	Cautín para soldar (si se conector de empalme)
<b>S-03</b>	<b>Fuente de alimentación 12 V para LED</b>	Iluminación	1	Adaptador 12 V / 2 A	Alimenta las tiras LED de forma segura	—
<b>S-04</b>	<b>Generador de humo 400 W</b>	Visualización de flujo	1	Resistencia eléctrica + líquido de glicol	Introduce partículas finas al flujo, haciéndolo visible para el observador	—

<b>S-05</b>	<b>Tubo flexible para guía de humo</b>	Visualización	1	Manguera de plástico flexible Ø 10 mm	Dirige el humo desde el generador hasta el interior de la sección de prueba con precisión	Tijeras / navaja
<b>S-06</b>	<b>Arduino Uno R3 (o clon)</b>	Sistema de medición	1	Tarjeta PCB con microcontrolador AVR	Recibe los datos del sensor de velocidad, los procesa y los envía a la pantalla LCD	Laptop con IDE Arduino (gratuito)
<b>S-07</b>	<b>Sensor anemómetro KY-003</b>	Medición	1	Módulo electrónico de efecto Hall	Mide la velocidad del flujo de aire en la sección de	—

					prueba y la envía al Arduino	
<b>S-08</b>	<b>Pantalla LCD 16×2 + módulo I<sup>2</sup>C</b>	Interfaz de datos	1	Módulo electrónico	Muestra en tiempo real la velocidad del flujo medida por el sensor (en m/s)	—
<b>S-09</b>	<b>Protoboard 830 puntos + cables dupont</b>	Conexiones electrónicas	1	Plástico + cobre (reutilizable)	Permite armar el circuito sin soldadura, fácil de modificar entre prácticas	—
<b>S-10</b>	<b>Dimmer / variador de velocidad 220 V</b>	Control de flujo	1	Electrónico — hasta 600 W	Regula las RPM del ventilador y, por tanto, la velocidad del flujo en el túnel	—
<b>S-11</b>	<b>Pintura acrílica negra mate</b>	Acabado interior	1	Bote / aerosol 500 ml	Se aplica al interior del túnel para crear fondo oscuro y mejorar la visibilidad del humo	Brocha de 2" o rodillo del

<b>S-12</b>	<b>Silicón transparente estructural</b>	Sellado de juntas	2	Cartucho 300 ml	Sella los bordes y uniones entre secciones para evitar fugas de aire que afecten el flujo	Pistola de silicón
<b>S-13</b>	<b>Tornillos autorroscantes 1" + mariposas</b>	Ensamble modular	50	Acero galvanizado	Unen los módulos de forma segura y permiten desarmar el túnel rápidamente sin herramienta especial	Destornillador de estrella

### C) HERRAMIENTAS Y EQUIPO DE TALLER

<b>H-01</b>	<b>Sierra caladora eléctrica</b>	Herramienta de corte	1	Eléctrica / corte de madera y plástico	Corte de los paneles de MDF y acrílico a medida	—
<b>H-02</b>	<b>Taladro eléctrico de mano + juego de brocas</b>	Herramienta de perforación	1	Eléctrica	Perforaciones para tornillos de ensamble y orificios del	—
					sensor y tubo de humo	
<b>H-03</b>	<b>Escuadra de carpintero (90°) + cinta métrica de 3 m</b>	Medición y trazado	1	Acero	Trazado preciso de las piezas antes del corte; verificación de escuadra en el ensamble	—
<b>H-04</b>	<b>Lija en hoja grano 120 y 220</b>	Acabado	—	Papel abrasivo	Suavizado de bordes de MDF y acrílico para evitar filtraciones de aire	—
<b>H-05</b>	<b>Pistola de silicón</b>	Aplicación de sellante	1	Manual / cartucho o estándar	Aplicación uniforme del silicón en juntas y uniones	—

<b>H-06</b>	<b>Multímetro digital</b>	Equipo de medición eléctrica	1	Digital / manual	Verificación de voltaje, corriente y continuidad del circuito electrónico	—
<b>H-07</b>	<b>Laptop con IDE Arduino (software gratuito)</b>	Equipo de programación	1	Software libre + hardware de uso escolar	Programar el Arduino, cargar el sketch de lectura del sensor y monitorear datos en tiempo real	Descarga: <a href="https://www.arduino.cc/en">https://www.arduino.cc/en</a>
<b>H-08</b>	<b>Cautín de 30 W + estaño</b>	Soldadura (opcional)	1	Eléctrico	Para conexiones permanentes en el circuito LED si no se usan conectores de empalme	—

*Nota.* Los códigos P-XX corresponden a piezas principales (estructura y propulsión), S-XX a piezas secundarias (visualización, medición y acabados) y H-XX a herramientas de taller. Las herramientas del bloque C no representan costo adicional si el laboratorio ya las posee. El número de piezas de MDF (P-01 a P-07) puede variar  $\pm 1$  unidad según el método de ensamble elegido durante la fabricación. Elaboración propia (2026).

**Tabla 9**  
**Diagrama de Grantt**

Tarea	16/2 al 24/3	13/4 al 19/4	20/4 al 26/4	27/4 al 3/5	4/5 al 10/5	11/5 al 7/5	18/5 al 24/5	25/5 al 31/5	01/0 6 al 07/0 6	8/6 al 10/6	Responsabl e
Inicio del proceso de desarrollo del documento el cual se investiga sobre los antecedentes de investigación											José Garnica
Anexo de la lista de materiales, cotizaciones, cálculos, diseño y diagramas al documento en desarrollo											Adrián Manrique
Compra de materiales principales e inicio del proceso de construcción del túnel (corte de las piezas principales para la estructura)											Luis Pérez
Ensamblaje de las piezas principales ya anteriormente cortadas de la base de la estructura											Sofía Recoder
Fabricación del sistema de mallas y filtros en la entrada para eliminar vórtices y enderezar el flujo (base del radiador)											Mateo Saldívar
Unión del ensamblaje del sistema de ventilación a la estructura principal junto con la base donde ira colocada adecuadamente la parte de la programación											Luis Pérez
Montaje del ventilador y configuración junto con la parte de programación											Adrián Manrique
Instalación de sensores y prueba del código en el Arduino											Sofía Recoder
Con el proyecto ya casi terminado inicio de prueba de flujo, visualización con humo y observar si hay turbulencia, para ajustar en caso de algún problema técnico (muestra final a profesores encargados de este proyecto)											Sofía Recoder
Recolección de datos y ejecución de las pruebas finales con el proyecto finalmente terminado para la toma de medidas de la aerodinámica lograda											Mateo Saldívar
Cierre y entrega final del reporte técnico y preparación de la logística para la expotrónica del 10 de junio.											José Garnica

Nota: Este cronograma de Grantt garantiza el flujo laminar para el 10 de junio. Inicia con diseño y cálculo (Semanas 1- 2), sigue con construcción y estanqueidad (Semanas 3-6) y finaliza con un margen de pruebas y corrección de turbulencias (Semanas 7-10). Esta secuencia lógica asegura un prototipo funcional y validado para la entrega final.

## Capítulo IV. Proceso de Construcción

---

El presente capítulo documenta el proceso físico de construcción del túnel de viento modular mediante evidencia fotográfica ordenada cronológicamente. Cada figura presenta la imagen de la actividad junto con una descripción de lo que se observa, vinculada con las especificaciones técnicas del Capítulo III.



**Figura 1**

*Corte de listones de madera con sierra caladora eléctrica. El alumno sujeta el material sobre el suelo mientras realiza el corte de la pieza para la estructura del túnel de viento (piezas P-01/P-02, Tabla 8).*



**Figura 2**

*Inspección manual de las piezas de madera recién cortadas. El alumno revisa el acabado y escuadra de los listones, verificando que las dimensiones correspondan a las especificadas en la Tabla 7.*



**Figura 3**

*Ensamblaje de piezas con sierra caladora y pegamento de contacto. Se observan múltiples listones en proceso de unión, junto con la herramienta eléctrica y el pegamento sobre el área de trabajo exterior.*



**Figura 4**

*Clavado y unión de piezas de madera de la estructura principal. El alumno utiliza un martillo para fijar los listones de MDF en ángulo de 90°, formando la esquina de una de las secciones modulares.*



**Figura 5**

*Ensamblaje preliminar de la cámara rectangular de prueba (P-04). Se muestra la sección principal del túnel ya armada con sus cuatro caras de madera y listones de refuerzo, vista desde el frente.*



**Figura 6**

*Perforación de la tapa de madera del porta-ventilador con taladro eléctrico. El alumno traza y perfora el orificio circular para el alojamiento del ventilador axial de 12" (pieza P-07, Tabla 8).*



**Figura 7**

*Estructura modular del túnel de viento ensamblada en vista lateral. Se observan las secciones de la cámara de entrada, contracción y sección de prueba unidas con silicón estructural y tornillos de mariposa.*



**Figura 8**

Anemómetro digital compacto adquirido para la medición de la velocidad del flujo de aire en la sección de prueba. El instrumento cuenta con pantalla LCD y botones de modo y configuración (pieza S-07, Tabla 8).



**Figura 9**

Microcontrolador Arduino UNO R3 con cable USB de conexión. Actúa como unidad de adquisición de datos del sensor de velocidad y control del sistema de medición digital (pieza S-06, Tabla 8).



**Figura 10**

Componentes electrónicos: fuente de alimentación 12 V, módulo LCD con interfaz I<sup>2</sup>C (OKY4005-3), módulo de control y sensor de carga. Corresponden a las piezas S-03 y S-08 de la Tabla 8.



**Figura 11**

Componentes electrónicos adicionales: sensor DHT11 en bolsa antiestática, módulo H-Bridge para control de motor, galga extensométrica con cableado y potenciómetro rotativo para regulación de señal.

## Referencias

Las siguientes referencias están organizadas en orden alfabético por apellido del primer autor, conforme a las normas de la 7.<sup>a</sup> edición del Manual de Publicaciones de la American Psychological Association (APA, 2020). Se incluyen todas las fuentes citadas en los tres capítulos del presente trabajo.

- Anderson, J. D. (2017). *Fundamentals of aerodynamics* (6.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill Education.
- American Psychological Association. (2020). *Publication manual of the American Psychological Association* (7.<sup>a</sup> ed.). <https://doi.org/10.1037/0000165-000>
- Barlow, J. B., Rae, W. H., & Pope, A. (1999). *Low-speed wind tunnel testing* (3.<sup>a</sup> ed.). Wiley.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Fluid mechanics: Fundamentals and applications* (4.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill Education.
- Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería. (2020). *Marco de referencia para la acreditación de programas de ingeniería en México* (5.<sup>a</sup> ed.). CACEI. <https://www.cacei.org.mx>
- Felder, R. M., & Brent, R. (2016). *Teaching and learning STEM: A practical guide*. Jossey-Bass.
- Fox, R. W., Pritchard, P. J., & McDonald, A. T. (2015). *Introduction to fluid mechanics* (8.<sup>a</sup> ed.). Wiley.
- González, M. A., & Ramírez, J. C. (2020). Diseño y construcción de un túnel de viento de bajo costo para laboratorios universitarios en México. *Revista de Ingeniería Mecánica y Eléctrica*, 17(2), 45–58. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.17.2.004>
- Mehta, R. D., & Bradshaw, P. (1979). Design rules for small low speed wind tunnels. *Aeronautical Journal*, 83(827), 443–449. <https://doi.org/10.1017/S0001924000031985>
- Merrill, M. D. (2002). First principles of instruction. *Educational Technology Research and Development*, 50(3), 43–59. <https://doi.org/10.1007/BF02505024>
- Munson, B. R., Okiishi, T. H., Huebsch, W. W., & Rothmayer, A. P. (2013). *Fundamentals of fluid mechanics* (7.<sup>a</sup> ed.). Wiley.
- Rathakrishnan, E. (2011). *Instrumentation, measurements and experiments in fluids*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11106>
- Schlichting, H., & Gersten, K. (2017). *Boundary-layer theory* (10.<sup>a</sup> ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-52919-5>
- Secretaría de Educación Pública. (2023). Programa de fortalecimiento de laboratorios en instituciones de educación superior tecnológica. SEP. <https://www.sep.gob.mx>
- Servicio de Administración Tributaria. (2024). Guía para la correcta aplicación del Impuesto al Valor Agregado en México. SAT. <https://www.sat.gob.mx>
- Torres, R., & Vega, L. (2019). Experiencias en la implementación de túneles de viento didácticos en universidades latinoamericanas. *Ingeniería y Desarrollo*, 37(1), 12–29. <https://doi.org/10.14482/inde.37.1.8543>
- White, F. M. (2016). *Fluid mechanics* (8.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill Education.

Ziada, S., & Rockwell, D. (1982). Oscillations of an unstable mixing layer impinging upon an edge. *Journal of Fluid Mechanics*, 124, 307–334. <https://doi.org/10.1017/S0022112082002511>

## Anexos

### Anexo A

#### Diagrama de Gantt del Proyecto

**Tabla 9**

*Diagrama de Gantt del Proyecto de Construcción del Túnel de Viento Modular*

Tarea	16/2 24/3	13/4 19/4	20/4 26/4	27/4 3/5	4/5 10/5	11/5 17/5	18/5 24/5	25/5 31/5	1/6 7/6	8/6 10/6	Responsable
Inicio del proceso de desarrollo del documento (investigación de antecedentes)	■										José Garnica
Anexo de materiales, cotizaciones, cálculos, diseño y diagramas al documento	■	■									Adrián Manrique
Compra de materiales principales e inicio de la construcción del túnel		■	■								Luis Pérez
Ensamblaje de las piezas principales de la base de la estructura			■								Sofía Recoder
Fabricación del sistema de mallas y filtros en la entrada del túnel				■							Mateo Saldívar
Unión del sistema de ventilación a la estructura principal					■						Luis Pérez
Montaje del ventilador y configuración del sistema de programación						■					Adrián Manrique
Instalación de sensores y prueba del código en el Arduino							■				Sofía Recoder
Prueba de flujo con humo, visualización y ajuste de turbulencias								■			Sofía Recoder
Recolección de datos y pruebas finales de aerodinámica									■		Mateo Saldívar
Cierre, entrega final del reporte técnico y logística para Expotrónica										■	José Garnica

Nota. Este cronograma garantiza la entrega del prototipo funcional el 10 de junio de 2026. La secuencia inicia con diseño y cálculo (semanas 1–2), continúa con construcción y estanqueidad (semanas 3–6) y finaliza con pruebas de flujo, corrección de turbulencias y entrega final (semanas 7–10). Elaboración propia (2026).

## **Anexo B**

### *Pasaporte de Validación del Proyecto (F\_PROY\_V1.0\_IIL6\_26)*

El Pasaporte del Proyecto es el documento oficial de Universidad Modelo que certifica la validación interdisciplinaria del proyecto por parte de los maestros de materia correspondientes. Su firma acredita que el proyecto cuenta con el visto bueno técnico necesario para avanzar a la fase de construcción e implementación.



F\_PROY\_V1.0\_III.6\_26

### PASAPORTE DEL PROYECTO

Datos Generales	Fase conceptual	Validación interdisciplinaria	Cierre técnico
<p><b>Nombre de proyecto:</b> <b>TÚNEL DE VIENTO TRUPER SACALUM</b></p> <p>Nivel/Semestre Inicial (2º-4º) <input type="checkbox"/> Intermedio (5º-6º) <input type="checkbox"/> Terminal (7º-8º) <input type="checkbox"/></p> <p>Equipo: Adrián Manrique, Sofía Recoder, Luis Balam, Mateo Saldivar, José Garnica</p> <p>Atributo de Egreso (AE) de CACEI principal a Evaluar:</p> <p>AE APL CONC 1 <input type="checkbox"/> AE IDENTIFICACION Y SOLUCION DE PROBLEMAS 2 <input type="checkbox"/> AE DISEÑO DE SOLUCIONES 3 <input type="checkbox"/> AE INVESTIGACION 4 <input type="checkbox"/> AE APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS MORDENAS 5 <input type="checkbox"/> AE EIN 6 <input type="checkbox"/> AE ETICA PROFESIONAL 7 <input type="checkbox"/> AE TRABJO EN EQUIPO 8 <input type="checkbox"/> AE COMUNICACIÓN 9 <input type="checkbox"/></p> <p><i>Este pasaporte existe para asegurar que tu proyecto es técnicamente válido,</i></p>	<p><b>Autotrónica:</b> Fabricar un túnel de viento con la finalidad de instrumentarlo para medir parámetros como la velocidad del viento, la temperatura y la humedad del aire, así como la fuerza del arrastre y carga aerodinámica del vehículo de prueba por medio de sensores.</p> <p><input type="checkbox"/> SI <input checked="" type="checkbox"/> Parcialmente <input type="checkbox"/> No Ing. Emmanuel Caamal Chan VoBo. Maestro de Materia</p> <p><i>para poder llegar a este punto es necesario correr las pruebas en el túnel con los sensores</i></p> <p><b>Sistemas de Gestión de Calidad:</b> identifica el proceso cualitativo, y su impacto en la empresa. Tiene claridad del proceso de calidad <input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> Parcialmente <input type="checkbox"/> No VoBo. Maestro de Materia</p> <p>El proyecto <b>NO</b> será autorizado para la fase de construcción/implementación sin esta sección validada.</p> <p>Riesgo técnico: <u>Bajo / Medio / Alto</u></p> <p><i>[Signature]</i> <b>MDN. VANESSA COB GUTIÉRREZ</b> VoBo Profesor PROYECTOS VI</p>	<p><b>ESTÁTICA:</b> Evaluar el uso de los temas estática a través de un análisis de fuerzas sobre el vehículo antes y después del funcionamiento.</p> <p><input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> Parcialmente <input type="checkbox"/> No Dr. Alberto Gabriel Vega Poot VoBo. Maestro de Materia <i>[Signature]</i></p> <p><b>Algebra matricial y vectorial:</b> Aplicar matrices para organizar y sistematizar las mediciones obtenidas en el túnel de viento, y utilizar vectores para representar e interpretar las variables del proyecto que admiten descripción vectorial con el fin de comunicar resultados coherentes y comparables entre sí. Dra. Fatima Widman Aguayo VoBo. Maestro de Materia</p> <p><b>Proyectos II:</b> Realización de documento (fase planeación determinación de objetivos, antecedentes de investigación, calendarización de actividades, bocetaje o diseño, cálculos, recursos a utilizar, diagramas, pruebas y mediciones, conclusiones) <input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> Parcialmente <input type="checkbox"/> No Mtra. Vanessa Cob Gutiérrez VoBo. Maestro de Materia</p> <p><b>Sistemas de Gestión de Calidad:</b> identifica el proceso cualitativo, y su impacto en la empresa. Tiene claridad del proceso de calidad <input checked="" type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> Parcialmente <input type="checkbox"/> No VoBo. Maestro de Materia</p> <p><b>Sistemas de Gestión de Calidad:</b> identifica el proceso cualitativo, y su impacto en la empresa. Tiene claridad del proceso de calidad <input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> Parcialmente <input type="checkbox"/> No VoBo. Freddy Catzin</p>	<p><i>A llenar por el profesor titular de la materia de Proyectos o el Evaluador Externo (G).</i></p> <p><b>Nivel de logro del AE seleccionado:</b></p> <p><input type="checkbox"/> <b>Insuficiente:</b> El proyecto funciona por azar o carece de sustento. No hay dominio de conceptos.</p> <p><input type="checkbox"/> <b>En Desarrollo:</b> El proyecto tiene bases teóricas pero fallas en la implementación o validación.</p> <p><input type="checkbox"/> <b>Satisfactorio:</b> El proyecto demuestra aplicación correcta de ingeniería, costos y diseño. (Nivel esperado).</p> <p><input type="checkbox"/> <b>Sobresaliente:</b> Innovación clara, rigor técnico impecable y validación externa positiva.</p> <p><b>DICTAMEN FINAL DEL PASAPORTE</b></p> <p><input type="checkbox"/> Proyecto validado <input type="checkbox"/> Proyecto en riesgo con observaciones finales <input type="checkbox"/> Proyecto no cumple criterios ingenieriles</p>

Anotaciones: Cada VoBo. aprobado es un sello de frontera. / El pasaporte dice si el proyecto es válido. La materia decide cuánto vale en puntos.

Nota. Pasaporte de Proyecto F\_PROY\_V1.0\_IIL6\_26 correspondiente al Túnel de Viento TRUPER SACALUM. Documento firmado por MDN. Vanessa Cob Gutiérrez (VoBo Profesor Proyectos VI) y los maestros de materia de las disciplinas validadoras: Estática, Álgebra Matricial y Vectorial, Proyectos II, y Sistemas de Gestión de Calidad. Elaboración propia (2026).