# TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
# Instituto Tecnológico de Culiacán

**TITULACIÓN INTEGRAL**
**OPCIÓN:**
TESIS PROFESIONAL
**NOMBRE DEL PROYECTO:**
"Diseño de difusor de humo para análisis de modelos aerodinámicos en túnel de viento subsónico"


**ALUMNO(A):**
Pedro Guerrero Meza

**CARRERA:**
INGENIERIA MECATRONICA

**No. DE CONTROL:**
20170441


Culiacán, Sinaloa

Educación
Secretaría de Educación Pública
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Culiacán

DIVISION DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ASUNTO: **Autorización de Impresión**

Culiacán, Sinaloa, 26/09/2025 15:16

**C. PEDRO GUERRERO MEZA**
**PASANTE(S) DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**
**P R E S E N T E.**

De acuerdo con fallo emitido por la Comisión Revisora Integrada por:

| | | Cédula Profesional |
|---|---|---|
| Presidente: | Ingeniero Industrial en Mecánica<br>**Angel Velazco** | 1434602 |
| Secretario: | Doctor en Ingeniería de Materiales<br>**Ismael Díaz Peña** | 9798300 |
| Vocal: | Doctor en Ciencias de la Ingeniería<br>**Omar Jhovany Payan Serrano** | 11461565 |

Y considerando que reúne los requisitos establecidos en la Opción: **TITULACIÓN INTEGRAL: TESIS PROFESIONAL "DISEÑO DE DIFUSOR DE HUMO PARA ANÁLISIS DE MODELOS AERODINÁMICOS EN TÚNEL DE VIENTO SUBSÓNICO"**, damos a usted nuestra autorización para que proceda a imprimir su trabajo profesional.

Sin otro particular, quedo de usted.

**A T E N T A M E N T E**
***Excelencia en Educación Tecnológica®***

Educación
Secretaría de Educación Pública
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CULIACÁN
DEPARTAMENTO DE DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

**LIC. CONCEPCIÓN MENDOZA ROSALES**
**JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES**

2025 Año de La Mujer Indígena


Juan de Dios Bátiz 310 Pte. Col. Guadalupe C.P. 80220
Culiacán, Sinaloa. Tel. 667-454-0100
tecnm.mx www.culiacan.tecnm.mx

## AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a los docentes del área de Metal-Mecánica del Instituto Tecnológico de Culiacán por el apoyo y la disposición mostrados a lo largo de mi formación profesional. En especial, agradezco al ingeniero Ángel Velazco, quien siempre confió en mí, motivándome a asumir nuevos retos, impulsando mis ideas de innovación tecnológica y acompañándome en mi desarrollo académico y personal.

De igual forma, extiendo mi gratitud al doctor Ismael Díaz Peña, al doctor Omar Jhovany Payán Serrano y al ingeniero José Ángel Alcaraz Vega, quienes brindaron sus conocimientos, consejos y tiempo para la elaboración de este proyecto, contribuyendo significativamente a su culminación.

También quiero reconocer la labor de los docentes que dejaron una huella importante en mi formación: el maestro en ciencias Ricardo Ernesto Domínguez Rodríguez, el maestro en ciencias Ignacio Manzo García, el maestro en ciencias Guillermo Higuera Pérez y el maestro en ciencias Dagoberto Tolosa Mata. Gracias por su dedicación, por compartir su experiencia con pasión y por motivarme a seguir aprendiendo y aplicando con responsabilidad los conocimientos adquiridos.

## DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado, en primer lugar, a mi familia, quienes han sido el pilar fundamental en cada etapa de mi vida. Gracias por su apoyo incondicional, por alentarme siempre a seguir adelante y por brindarme fortaleza tanto en lo personal como en lo profesional. A mi padre, Pedro Guerrero Bojórquez, y a mi madre, Claudia Marcela Meza López, por ser ejemplo de esfuerzo, dedicación y amor inagotable. A mi hermana, la doctora Claudia Alejandra Guerrero Meza, y a mi cuñado, M.C. Jorge Eduardo Haros Villegas, por motivarme con su ejemplo y acompañarme en este camino con paciencia y cariño. Sin ustedes, nada de lo que hoy celebro sería posible.

De igual manera, deseo expresar mi agradecimiento a mis amigos, quienes han estado presentes no solo durante la realización de este proyecto, sino a lo largo de los años. Gracias por compartir alegrías, retos y aprendizajes, y por convertirse en una familia elegida que me acompaña con confianza y amistad sincera. En especial, a Andrea Rodríguez Navarro, Brittany García, José Roberto Flores Félix y Paloma de Fátima Alvarado Castro, quienes han sido parte esencial de esta etapa de mi vida.

Asimismo, agradezco profundamente a quienes me acompañaron de manera directa en la realización de este proyecto. Su apoyo fue parte fundamental de mis descubrimientos, aportando nuevas ideas, complementando esfuerzos y estando siempre a mi lado en cada paso. A Luis Daniel Arreola Murillo y Edder Jafeth Moreno Villegas, mi gratitud por su dedicación y compañerismo.

Finalmente, extiendo mi reconocimiento a quienes me inspiraron y motivaron a elegir este camino profesional. Agradezco al ingeniero Oscar Esteban Cazares Almaral, al ingeniero Ludwig Fernando Neri Ojeda, al licenciado Diego Antonio Gastélum López y a la maestra en ciencias Ana Bertha Astorga Mejía. Sus palabras, confianza y ejemplo fueron decisivos en mi formación y en mi elección de carrera. Gracias por creer en mí incluso antes de iniciar este recorrido y por darme la motivación necesaria para alcanzar mis metas.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN ..... 11
1.1. Planteamiento del problema ..... 11
1.1. Objetivo general ..... 12
1.2. Objetivos específicos ..... 13
1.3. Justificación ..... 13
1.4. Alcance del proyecto ..... 14
1.5. Hipótesis ..... 15
2. FUNDAMENTO TEORICO ..... 16
2.1. Antecedentes de análisis de fluidos ..... 17
2.1.1. Principio de Bernoulli ..... 17
2.1.2. Tubos de Venturi ..... 19
2.1.2.1. Principio teórico y derivación de la ecuación ..... 19
2.1.2.1.1. Principio de Bernoulli en tubos de Venturi ..... 19
2.1.2.1.2. Ecuación de continuidad ..... 20
2.1.2.2. Elementos de diseño y configuración ..... 21
2.1.2.3. Aplicaciones y requisitos de instalación ..... 21
2.1.3. Numero de Reynolds ..... 22
2.1.4. Propiedades físicas del aire ..... 24
2.1.4.1. Densidad ..... 25
2.1.4.2. Viscosidad ..... 25
2.2. Túneles de viento ..... 26
2.2.1. Métodos de visualización de flujo en túnel de viento subsónico ..... 27
2.2.2. Importancia de la visualización de flujo en la aerodinámica ..... 29
2.3. Matriz Ortogonal Taguchi L8 ..... 30
3. DESCRIPCION DE LAS ACTIVIDADES ..... 32
3.1. Definición de diseño ..... 32
3.1.1 Variables para considerar ..... 32
3.1.1.1. Alcance de las entradas cónicas de los tubos de Venturi ..... 34
3.1.1.1.1. Tipos de alcances ..... 35

3.1.1.2. Salidas cónicas de los tubos de Venturi ..... 36
3.1.1.2.1. Tipos de salidas ..... 37
3.1.1.3. Radio de garganta del tubo de Venturi ..... 38
3.1.1.3.1. Tipos de Radios de garganta ..... 39
3.1.1.4. Diámetro Interno del dispositivo de almacenamiento ..... 39
3.1.1.4.1. Tipos de diámetros internos del dispositivo de almacenamiento ..... 40
3.1.1.5. Propiedades internas del dispositivo de almacenamiento ..... 41
3.1.1.5.1. Tipo de propiedades internas ..... 41
3.1.1.6. Numero de salidas con tubos de Venturi ..... 42
3.1.1.6.1. Variación de cantidades ..... 42
3.1.2. Aplicación de matriz ortogonal para modelos a diseñar ..... 43
3.1.2.1. Características de modelo 1 ..... 44
3.1.2.2. Características de modelo 2 ..... 44
3.1.2.3. Características de modelo 3 ..... 44
3.1.2.4. Características de modelo 4 ..... 45
3.1.2.5. Características de modelo 5 ..... 45
3.1.2.6. Características de modelo 6 ..... 45
3.1.2.7. Características de modelo 7 ..... 46
3.1.2.8. Características de modelo 8 ..... 46
3.2. Diseño de modelos en software CAD ..... 46
3.3. Manufactura de modelos ..... 50
3.4. Método de pruebas ..... 53
3.4.1. Medición de presión estática ..... 54
3.4.2. Medición de presión dinámica ..... 55
3.4.3. Velocidad de entrada de flujo ..... 55
3.4.4. Velocidad de salida de flujo ..... 56
3.4.5. Resultados ..... 57
3.4.6. Aplicación de ecuación de numero de Reynolds ..... 58
3.5. Aplicación de resultados en Minitab ..... 60
3.5.1. Simulación de medias ..... 60

3.5.2. Análisis de resultados de cada variable ..... 62
3.5.3. Interpretación de modelo optimo ..... 64
3.6. Diseño del modelo optimo ..... 64
4. RESULTADOS ..... 66
4.1. Obtención de pruebas de modelo optimo ..... 67
4.2. Aplicación de ecuación del número de Reynolds en modelo optimo ..... 68
4.3. Comparación de resultados previos ..... 69
5. CONCLUSIONES ..... 72
6. FUENTES DE INFORMACIÓN ..... 76
7. REGISTROS DE PRODUCTOS ..... 78

## INDICE DE FIGURAS, TABLAS Y ECUACIONES

*Figura 2—1: Principio de Bernoulli en conducto de sección variable (Fuji Electric, 2024)* ..... *18*

*Figura 2—2: Flujo laminar y turbulento (Osma, 2019)* ..... *24*

*Figura 2—3: Túnel de viento subsónico en el Tecnológico Nacional de México, campus Culiacán* ..... *27*

*Figura 2—4: Técnica de humo en túnel de viento (Frederiksen, 2023)* ..... *28*

*Figura 2—5: Técnica de tinte en estudios aerodinámicos en formula 1 (Marca, 2024)* ..... *29*

*Figura 3—1: Alcance de la entrada cónica extendida y a la altura de la pared* ..... *35*

*Figura 3—2: Alcance de la salida cónica sin cañón y con cañón* ..... *37*

*Figura 3—3: Garganta de los tubos de Venturi* ..... *39*

*Figura 3—4: Diámetro interno del dispositivo de almacenamiento* ..... *40*

*Figura 3—5: Interior del dispositivo de almacenamiento con enroscado y sin enroscado* ..... *41*

*Figura 3—6: Diseño en SolidWorks del modelo 1* ..... *48*

*Figura 3—7: Diseño en SolidWorks del modelo 2* ..... *48*

*Figura 3—8: Diseño en SolidWorks del modelo 3* ..... *48*

*Figura 3—9: Diseño en SolidWorks del modelo 4* ..... *49*

*Figura 3—10: Diseño en SolidWorks del modelo 5* ..... *49*

*Figura 3—11: Diseño en SolidWorks del modelo 6* ..... *49*

*Figura 3—12: Diseño en SolidWorks del modelo 7* ..... *50*

*Figura 3—13: Diseño en SolidWorks del modelo 8* ..... *50*

*Figura 3—14:Impresora 3D Creality Ender-3 S1 Pro* ..... *51*

*Figura 3—15: Importación del modelo al software UltiMaker Cura* ..... *51*

*Figura 3—16: Ajustes de impresión* ..... *52*

*Figura 3—17: Vista previa de impresión en UltiMaker Cura* ..... *53*

*Figura 3—18: Manómetro digital Autool PT520* ..... *54*

*Figura 3—19: Toma de presión estática* ..... *55*

*Figura 3—20: Turbina S91C021* ..... *56*

*Figura 3—21: Anemómetro digital Peakmeter pm6252b* ..... *56*

*Figura 4—1: Modelo Optimo en UltiMaker Cura* ..... *66*

Figura 0—2: Vista superior de extracción de humo.....70

*Figura 0—3: Vista isométrica de extracción de humo*.....71

*Tabla 2—1: Matriz ortogonal L8* ____ *31*

*Tabla 3—1: Variables de diseño y sus 2 tipos.* ____ *44*

*Tabla 3—2: Variables de diseño de modelo 1* ____ *44*

*Tabla 3—3: Variables de diseño de modelo 2* ____ *44*

*Tabla 3—4: Variables de diseño de modelo 3* ____ *45*

*Tabla 3—5: Variables de diseño de modelo 4* ____ *45*

*Tabla 3—6: Variables de diseño de modelo 5* ____ *45*

*Tabla 3—7: Variables de diseño de modelo 6* ____ *46*

*Tabla 3—8: Variables de diseño de modelo 7* ____ *46*

*Tabla 3—9: Variables de diseño de modelo 8* ____ *46*

*Tabla 3—10: Prueba de resultados de presión estática y dinámica por toma de salida de humo* ____ *57*

*Tabla 3—11: Resultados de velocidades de salida por toma y velocidad máxima de cada modelo* ____ *58*

*Tabla 3—12: Dimensiones de sección lineal de la garganta de cada modelo* ____ *59*

*Tabla 3—13: Resultados finales de cada modelo con su caracterización de flujo* ____ *59*

*Tabla 3—14: Análisis de la matriz en Minitab usando la columna C8 como análisis de respuesta* ____ *60*

*Tabla 3—15: Análisis de varianza de medias* ____ *61*

*Tabla 3—16:Tabla de respuestas para media* ____ *62*

*Tabla 3—17: Grafica de efectos principales para relaciones SN* ____ *62*

*Tabla 3—18: Grafica de efectos principales para medias* ____ *64*

*Tabla 3—19: Configuración para el modelo optimo* ____ *65*

*Tabla 4—1: Resultados de presión estática y presión dinámica* ____ *67*

*Tabla 4—2: Resultados de velocidad* ____ *67*

*Tabla 4—3: Valores necesarios para nuestra ecuación de numero de Reynolds.* ____ *68*

*Ecuación 2—1: Ecuación de Bernoulli* ..... *18*

*Ecuación 2—2: Ecuación de Bernoulli simplificada en tubos de Venturi* ..... *19*

*Ecuación 2—3: Ecuación de continuidad* ..... *20*

*Ecuación 2—4: Ecuación de flujo para el tubo de Venturi* ..... *20*

*Ecuación 2—5: Ecuación de numero de Reynolds* ..... *23*

*Ecuación 2—6: Ecuación de estado de gas ideal en su forma para densidad* ..... *25*

*Ecuación 4—1: Aplicación de ecuación de numero de Reynolds del modelo optimo.* ..... *68*

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Planteamiento del problema

El estudio del comportamiento del flujo de aire sobre diferentes superficies ha sido, desde hace décadas, un tema de gran relevancia para el desarrollo científico y tecnológico. Los túneles de viento se han consolidado como una herramienta indispensable para analizar la interacción entre el aire y distintos modelos, ya que permiten observar fenómenos como la sustentación, la resistencia aerodinámica, las perturbaciones del flujo y el arrastre generado por los cuerpos expuestos. Estos análisis resultan fundamentales en industrias como la aeroespacial, la automotriz, la ingeniería civil e incluso en el ámbito de las energías renovables, en donde la optimización del diseño de piezas y estructuras depende en gran medida del conocimiento detallado del comportamiento aerodinámico.

Para que los resultados obtenidos en un túnel de viento sean confiables y útiles, no basta con realizar mediciones instrumentales de presión o velocidad, sino que también es necesario contar con métodos de visualización adecuados que permitan observar de manera clara la interacción entre el flujo y el modelo en estudio. Una de las técnicas más empleadas para este fin es la inyección de humo, la cual posibilita introducir un trazo visible dentro de la corriente de aire con el objetivo de seguir su trayectoria y analizar cómo se redirige, se separa o se perturba al interactuar con una superficie. Gracias a este procedimiento, se pueden identificar zonas críticas de turbulencia, evaluar el arrastre y optimizar los diseños para minimizar pérdidas energéticas y mejorar el rendimiento aerodinámico.

En condiciones ideales, el sistema de inyección de humo debe garantizar un flujo estable, laminar y controlado, el cual se dirige hacia zonas específicas del modelo para obtener observaciones precisas. Sin embargo, en la práctica no siempre se cuenta con sistemas que reúnan estas características, lo que limita la calidad y confiabilidad de los resultados obtenidos.

Tal es el caso del Instituto Tecnológico Nacional de México, campus Culiacán, en cuyo departamento de Metal-Mecánica se dispone de un túnel de viento destinado a la realización

de prácticas y proyectos de investigación relacionados con perfiles aerodinámicos. Aunque dicho túnel cuenta con instrumentación para medir presión dinámica, su sistema de inyección de humo presenta deficiencias. Actualmente, el humo es generado y expulsado por medio de un dispositivo conectado directamente a un canal, el cual es manipulado manualmente por el usuario. Esta configuración provoca que el flujo de humo se expulse de forma turbulenta, generando una dispersión excesiva dentro de la cámara de pruebas. Como consecuencia, el humo no se adhiere adecuadamente a las trayectorias de aire alrededor del modelo, sino que se distribuye por toda la zona de observación, dificultando la visualización de los fenómenos de arrastre, separación y perturbación.

Esta limitación repercute directamente en la calidad de los estudios aerodinámicos que pueden realizarse en el laboratorio, ya que impide contar con representaciones claras y confiables del comportamiento del flujo. En consecuencia, resulta necesario proponer e implementar un sistema de inyección de humo más eficiente, capaz de generar un flujo estable, direccionado y libre de turbulencias indeseadas. La mejora de este subsistema no solo permitiría un mejor aprovechamiento del túnel de viento del instituto, sino que además incrementaría el valor académico y de investigación de las prácticas realizadas en él, beneficiando tanto a estudiantes como a futuros proyectos que requieran análisis aerodinámicos de mayor precisión.

### 1.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo para el túnel de viento del Instituto Tecnológico Nacional de México, campus Culiacán, que pueda integrarse al sistema de generación de humo, permitiendo contener y distribuir el humo a través de múltiples tomas de salida, con el fin de obtener mayores lecturas de estudio y generar un flujo laminar durante la extracción del humo, optimizando así la visualización y análisis del comportamiento aerodinámico del aire sobre los modelos de prueba.

### 1.2. Objetivos específicos

- Analizar los principios teóricos del flujo de aire aplicando las ecuaciones de Bernoulli y Reynolds para estableces los parámetros de diseño de los inyectores de humo
- Definir las variables de diseño del dispositivo mediante la aplicación de la matriz ortogonal Taguchi L8, con el fin de generar distintos modelos experimentales.
- Diseñar modelos de inyectores de humo en software CAD y prepararlos para su manufactura mediante impresión 3D.
- Realizar pruebas experimentales de presión estática, presión dinámica y velocidad de flujo en cada uno de los modelos diseñados.
- Calcular el número de Reynolds de cada modelo para determinar el tipo de flujo, ya sea laminar o turbulento, que se genera en cada configuración.
- Analizar los resultados obtenidos con el software Minitab para identificar las variables de mayor impacto sobre el comportamiento del flujo.
- Proponer y validar un modelo optimo de inyector de humo que logre un flujo laminar adecuado para ensayos aerodinámicos en túnel de viento.

### 1.3. Justificación

El desarrollo del inyector de humo optimizado mediante la técnica de diseño experimental aplicando la metodología Taguchi L8 ayuda a optimizar los estudios aerodinámicos en túneles de viento. Esto permitirá obtener flujos de humo más controlados y estables, favoreciendo así las líneas de corriente sobre los modelos a estudiar.

Además, con el uso del software Minitab nos aporta optimizar variables de diseño, reduciendo tiempos de estudio, manufactura, materiales y costos. Por lo que también nos ayudara a aplicar la matriz Taguchi L8, por lo que podemos realizar modelos eficientes sin la necesidad de fabricar múltiples prototipos al azar.

Todo esto, para poder aplicar el inyector adecuado en el túnel de viento y así poder añadir un nuevo estudio más eficiente para los modelos que se requieran estudiar en dicho

instrumento sin necesidad de causar alguna perturbación al estudio dinámico y optimizar el análisis dinámico de arrastre que genera la pieza y de perturbaciones que genere esta misma.

### 1.4. Alcance del proyecto

El presente proyecto contempla el diseño, fabricación y validación experimental de inyectores de humo destinados a pruebas en túneles de viento, para ello se desarrollará un proceso sistemático basado en principios de dinámica de fluidos y en la aplicación de la metodología de diseño experimental Taguchi L8, con apoyo del software Minitab, SolidWorks para diseñar dichos modelos y UltiMaker Cura para extraer los diseños de SolidWorks y hacer un plan de impresión. Todo esto con el objetivo de optimizar las variables de diseño y reducir el número de prototipos a fabricar.

Esto incluye:

- Análisis teórico de los principios de Bernoulli y Reynolds para establecer los parámetros fundamentales de diseño del inyector.
- Definición de las variables de diseño, cada una con dos niveles, a fin de configurar 8 modelos de prueba mediante la matriz ortogonal Taguchi L8.
- Diseño y modelado tridimensional de cada configuración en software CAD (SolidWorks 2019) y su preparación para impresión 3D (UltiMaker Cura).
- Fabricación de los prototipos mediante impresión 3D.
- Caracterización experimental de los modelos mediante la medición de presión estática, presión dinámica, velocidad de entrada y velocidad de flujo.
- Cálculo del número de Reynolds para cada modelo y la clasificación de flujo como laminar o turbulento.
- Análisis estadístico de los resultados mediante Minitab para identificar las variables más influyentes en el comportamiento del flujo y determinar la configuración optima.

- La validación experimental del modelo optimo, con el objetivo de obtener un numero de Reynolds menor a 2000, garantizando así un flujo laminar adecuado para ensayos aerodinámicos en túneles de viento.

## 1.5. Hipótesis

El diseño de un inyector de humo basado en los principios de Bernoulli, tubos de Venturi y el número de Reynolds, optimizado mediante la aplicación de la metodología Taguchi L8, permitirá obtener un modelo que genere un flujo laminar estable. De esta forma, se logrará una mejor visualización de líneas de corrientes en túneles de viento, así optimizando el uso de recursos materiales y experimentales en comparación con otros métodos tradicionales.

## 2. FUNDAMENTO TEORICO

El desarrollo del presente proyecto se basa en la aplicación de principios fundamentales de la mecánica de fluidos y la ingeniería de diseño experimental para resolver una problemática específica: la generación de un flujo de humo laminar y estable en un túnel de viento subsónico. Este enfoque es crucial para realizar análisis aerodinámicos precisos, ya que la calidad de los datos obtenidos depende directamente de la uniformidad y previsibilidad del flujo de aire sobre el modelo de prueba.

La base teórica del diseño del difusor de humo se fundamenta en las ecuaciones de Bernoulli y del número de Reynolds. El principio de Bernoulli describe la relación inversa entre la presión y la velocidad de un fluido en movimiento, un concepto fundamental para entender cómo se puede manipular el flujo de aire a través de una geometría específica. Al diseñar el difusor con principios similares a los tubos de Venturi, se busca variar la presión y la velocidad de extracción del fluido de manera controlada. El objetivo principal es lograr un control preciso del flujo para obtener un número de Reynolds bajo, lo que indica un régimen laminar, ideal para el análisis aerodinámico y la visualización de las líneas de corriente.

Además de los principios teóricos, se ha utilizado una matriz ortogonal Taguchi L8 para la filosofía de diseño. Esta metodología es una herramienta poderosa en la ingeniería de la calidad y el diseño robusto, ya que permite identificar de manera eficiente la combinación óptima de múltiples variables de diseño. En lugar de fabricar y probar un gran número de prototipos, esta matriz permite definir al menos seis variables de diseño, cada una con dos niveles, para crear ocho modelos experimentales estratégicamente seleccionados. Con el apoyo del software Minitab, se analizan los resultados de cada variable para identificar cuáles son las más críticas en el desempeño del difusor, permitiendo generar un modelo optimizado. Esta metodología reduce significativamente los costos y el tiempo de estudio, al enfocarse en los factores más influyentes en el rendimiento del sistema.

## 2.1. Antecedentes de análisis de fluidos

El estudio de los fluidos, ya sean líquidos o gases, es una de las disciplinas más antiguas y fundamentales de la ingeniería. La mecánica de fluidos sienta las bases para comprender el comportamiento de los sistemas que involucran el flujo de aire o líquidos, desde el diseño de aviones y automóviles hasta la optimización de sistemas de ventilación y tuberías. Este campo se divide principalmente en la estática de fluidos (fluidos en reposo) y la dinámica de fluidos (fluidos en movimiento).

Los principios que rigen la dinámica de fluidos, y que son cruciales para el diseño aerodinámico, están ampliamente documentados y son la base de la formación en ingeniería. Textos de referencia clásicos como los de (Çengel & Cimbala, 2018), (Fox, 2018), y (Mitchell, 2019), son pilares para comprender conceptos como la ecuación de Bernoulli, el número de Reynolds y las propiedades físicas del aire, los cuales son directamente aplicables a proyectos como el diseño de túneles de viento. La aplicación práctica de estas teorías permite analizar y predecir el comportamiento del flujo de aire, lo que es esencial para el éxito de cualquier proyecto de diseño aerodinámico.

### 2.1.1. Principio de Bernoulli

El Principio de Bernoulli es un concepto fundamental en la dinámica de fluidos que describe la relación entre la presión, la velocidad y la elevación de un fluido en movimiento. Tal como se define en la bibliografía, "un aumento en la velocidad de un fluido ocurre simultáneamente con una disminución en la presión o una disminución en la energía potencial del fluido" (Çengel & Cimbala, 2018). Este principio es un pilar fundamental para el diseño del difusor de humo, ya que permite manipular el flujo del aire y del humo para lograr las condiciones deseadas para el análisis aerodinámico.

La aplicación de este principio es vasta en ingeniería, desde la aerodinámica de aeronaves hasta el diseño de sistemas de tuberías. Al crear una sección más estrecha en el difusor, la velocidad del aire aumenta y, por consiguiente, su presión disminuye. Este efecto es la base

para lograr un flujo controlado y estable que permita la correcta visualización en el túnel de viento. La tesis utiliza esta relación para justificar el diseño del difusor.

La forma básica del Principio de Bernoulli se expresa en la *ecuación 2—1:*, la cual relaciona la presión, la velocidad y la altura en dos puntos diferentes a lo largo de una línea de corriente en un flujo ideal (incompresible y no viscoso):

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho g h_2$$

*Ecuación 2.1.1—1: Ecuación de Bernoulli*

En donde:

- $P$ es la presión del fluido
- $V$ es la velocidad de flujo
- $\rho$ es la densidad del flujo
- $h$ es la altura sobre el nivel de referencia
- $g$ es la aceleración debido a la gravedad $\left(9.81\ {}^{m}/_{s^2}\right)$

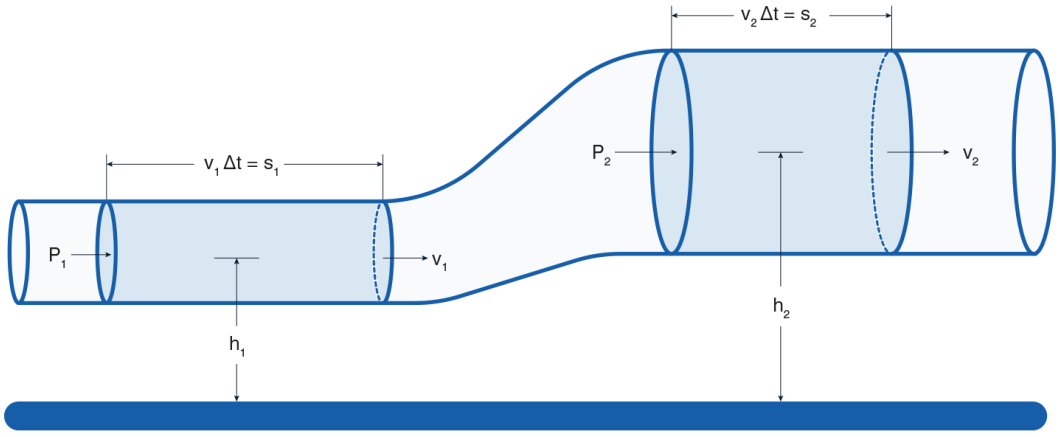



*Figura 2.1.1—1: Principio de Bernoulli en conducto de sección variable (Fuji Electric, 2024)*

### 2.1.2. Tubos de Venturi

El tubo de Venturi es un instrumento de medición de caudal que ha sido un pilar en la ingeniería de fluidos, nombrado en honor al físico italiano Giovanni Battista Venturi. Su diseño se basa en la conversión de energía de presión en energía cinética, un principio clave en la dinámica de fluidos. "Este medidor proporciona un método fiable y de bajo mantenimiento para la medición del flujo de fluidos, ya sean líquidos o gases, al convertir la energía de presión en energía cinética para una medición" (Çengel & Cimbala, 2018). Su uso es común en aplicaciones donde la precisión y la mínima pérdida de energía son de vital importancia. A diferencia de otros medidores, el diseño gradual del Venturi minimiza las turbulencias y las pérdidas de carga, lo que lo convierte en una solución energéticamente eficiente.

#### 2.1.2.1. Principio teórico y derivación de la ecuación

El funcionamiento del tubo de Venturi se fundamenta en la interrelación de dos principios físicos esenciales: el principio de Bernoulli y la ecuación de continuidad.

##### 2.1.2.1.1. Principio de Bernoulli en tubos de Venturi

En su forma más simple, este principio establece que para un flujo de fluido ideal (incompresible y no viscoso), la suma de la presión estática, la energía cinética y la energía potencial permanece constante a lo largo de una línea de corriente. Al diseñar el tubo de Venturi de manera horizontal, el término de energía potencial se vuelve despreciable. Por lo tanto, la ecuación se simplifica a:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2$$

*Ecuación 2.1.2.1.1—2: Ecuación de Bernoulli simplificada en tubos de Venturi*

Esta relación demuestra que en la sección de la garganta, donde el fluido acelera ($V_2 > V_1$), la presión estática ($P_2$) debe disminuir en proporción. "Un aumento en la velocidad de un fluido ocurre simultáneamente con una disminución en la presión o una disminución en la

energía potencial del fluido" (Çengel & Cimbala, 2018). Esta caída de presión es el fenómeno que se mide para determinar el caudal.

#### 2.1.2.1.2. Ecuación de continuidad

Este principio de conservación de la masa establece que el caudal másico en un flujo incompresible debe ser constante a lo largo de un tubo, sin importar las variaciones en su área transversal. Esto se expresa matemáticamente como:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 = Q$$

*Ecuación 2.1.2.1.2—3: Ecuación de continuidad*

Donde $Q$ es el caudal volumétrico. "El caudal de volumen del fluido es constante en un flujo incompresible y estacionario" (Çengel & Cimbala, 2018). Esta ecuación confirma que la velocidad del fluido es inversamente proporcional al área de la sección transversal.

Combinando y resolviendo estas dos ecuaciones para el caudal ($Q$), se obtiene la ecuación fundamental del tubo de Venturi. No obstante, en la práctica, las pérdidas por fricción del fluido y la formación de pequeñas turbulencias en la tubería real hacen que el caudal medido sea ligeramente menor al teórico. Para compensar esta discrepancia, se introduce el coeficiente de descarga ($C_d$), un factor empírico que representa la eficiencia del medidor. La ecuación final, utilizada para el cálculo práctico, es:

$$Q = C_d A_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho\left(1 - \left({}^{A_2}/_{A_1}\right)^2\right)}}$$

*Ecuación 2.1.2.1.2—4: Ecuación de flujo para el tubo de Venturi*

Este coeficiente $C_d$ es un factor clave en la precisión del Venturi. Por lo general, su valor se encuentra entre 0.95 y 0.98 y es relativamente constante en un amplio rango de números de Reynolds, lo que contribuye a la alta fiabilidad del dispositivo.

#### 2.1.2.2. Elementos de diseño y configuración

El diseño del tubo de Venturi es una ingeniería precisa con tres secciones críticas, cada una con una función específica:

- Sección Convergente: Esta es la sección de entrada, un cono que reduce suavemente el área de la tubería. Su diseño gradual con un ángulo de cono de aproximadamente 21° a 25° es crucial para acelerar el fluido de manera controlada y uniforme, minimizando la separación de la capa límite y las pérdidas de carga. Las tomas de presión se colocan en la entrada, donde el flujo es más estable, para obtener la presión $P_1$ .
- Garganta: La garganta es la sección de menor diámetro, de forma cilíndrica. Es aquí donde el fluido alcanza su máxima velocidad y la presión estática es mínima. Es en este punto donde se mide la segunda presión, $P_2$ .
- Sección Divergente: Esta sección final es un cono de expansión con un ángulo mucho más gradual (típicamente entre 5° y 15°). Su propósito es desacelerar el fluido de forma controlada y gradual. La baja tasa de expansión permite que la energía cinética se reconvierta eficientemente en energía de presión, minimizando las pérdidas permanentes. Esta capacidad de recuperación de presión es la principal ventaja operativa del tubo de Venturi, ya que reduce la energía necesaria para el bombeo o compresión del fluido.

#### 2.1.2.3. Aplicaciones y requisitos de instalación

El tubo de Venturi es ampliamente utilizado en una variedad de aplicaciones industriales y de investigación, aprovechando su alta precisión y su mínima pérdida de carga. Este dispositivo es la opción preferida para la medición de grandes caudales de líquidos y gases, y es particularmente útil en sistemas donde la eficiencia energética es una consideración crítica. Su diseño robusto, sin partes móviles, lo hace ideal para su uso con fluidos que contienen sólidos en suspensión, como en la industria de tratamiento de aguas, o en la dosificación de aditivos en procesos químicos. "Al no tener partes móviles, el dispositivo es

altamente resistente al desgaste y es adecuado para fluidos que contienen partículas o sólidos en suspensión" (Çengel & Cimbala, 2018).

Para garantizar un rendimiento óptimo, la instalación de un tubo de Venturi debe cumplir con requisitos específicos. Es fundamental que el dispositivo se instale en un tramo recto de tubería, tanto antes como después del medidor. Esta configuración es necesaria para asegurar que el fluido que ingresa al Venturi tenga un perfil de velocidad completamente desarrollado y uniforme, lo cual es indispensable para obtener lecturas de presión precisas. La falta de un tramo recto suficiente puede inducir turbulencia o un perfil de flujo asimétrico, lo que comprometería la exactitud de la medición. "Un perfil de flujo no uniforme provoca un error en la medición; por lo tanto, es importante asegurar que el flujo sea laminar para que el medidor de Venturi funcione correctamente" (Çengel & Cimbala, 2018).

### 2.1.3. Numero de Reynolds

El número de Reynolds (Re) es un parámetro adimensional de suma importancia en la mecánica de fluidos, ya que sirve como un criterio fundamental para determinar la naturaleza del flujo de un fluido, es decir, si este será laminar, de transición o turbulento. Según (Mitchell, 2019), este número adimensional "representa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas dentro de un flujo". Las fuerzas de inercia, vinculadas directamente al movimiento del fluido, tienden a desestabilizar el flujo y a promover un movimiento caótico. Por otro lado, las fuerzas viscosas, que provienen de la fricción interna de las capas del fluido, actúan como una fuerza de amortiguación que resiste el movimiento y fomenta un flujo ordenado y suave.

La relevancia de este número fue establecida por el ingeniero y físico Osborne Reynolds en 1883 a través de sus emblemáticos experimentos. Al inyectar un hilo de tinte en un flujo de agua que circulaba por una tubería de vidrio, Reynolds observó que a bajas velocidades, el tinte se movía como una línea recta y definida. Este comportamiento, conocido como flujo laminar, es un claro indicio de un movimiento ordenado en el que las capas de fluido no se mezclan entre sí. Sin embargo, al aumentar la velocidad del flujo, la línea de tinte se rompía y se dispersaba gradualmente, lo que evidenciaba un movimiento caótico y desordenado. "El flujo

turbulento se caracteriza por la irregularidad del movimiento" (Fox, 2018, p. 347). Este movimiento desordenado genera una intensa mezcla de las partículas del fluido, lo que incrementa significativamente la resistencia al flujo.

La expresión matemática del número de Reynolds es la siguiente:

$$Re = \frac{Fuerzas\ Inerciales}{Fuerzas\ Viscosas} = \frac{\rho * V * L}{\mu}$$

*Ecuación 2.1.3—5: Ecuación de numero de Reynolds*

Donde:

- $\rho$ es la densidad del fluido
- $V$ es la velocidad del fluido
- $L$ es el diámetro interno de la canal por donde se traslada el fluido
- $\mu$ es la viscosidad dinámica del fluido

El valor del número de Reynolds es lo que define el régimen de flujo. De acuerdo con los rangos establecidos a partir de los estudios de Reynolds y otros investigadores, se pueden distinguir tres regímenes principales:

- Flujo Laminar: Se caracteriza por un movimiento altamente ordenado, en el que las capas de fluido se deslizan suavemente una sobre otra sin un mezclado significativo. En este régimen, las fuerzas viscosas son dominantes, logrando suprimir cualquier tendencia de inestabilidad que pudiera surgir. Este comportamiento ocurre a números de Reynolds bajos. Para los flujos en tuberías, el límite crítico generalmente aceptado es $Re < 2300$.
- Flujo de Transición: A medida que el número de Reynolds se incrementa, el flujo entra en una fase de transición, un estado intermedio donde el régimen no es totalmente laminar ni completamente turbulento. Esta región, generalmente entre $2300 < Re < 4000$ para flujos en tuberías, se caracteriza por una inestabilidad intermitente, donde las fluctuaciones del flujo pueden aparecer y desaparecer de manera aleatoria.

- Flujo Turbulento: Ocurre a números de Reynolds elevados, típicamente $Re > 4000$. En este régimen, las fuerzas de inercia superan con creces a las fuerzas viscosas, lo que provoca la formación de remolinos, vórtices y movimientos caóticos a pequeña escala. La intensa mezcla de las partículas del fluido en este régimen resulta en una disipación de energía mucho mayor y en una resistencia al flujo significativamente incrementada.

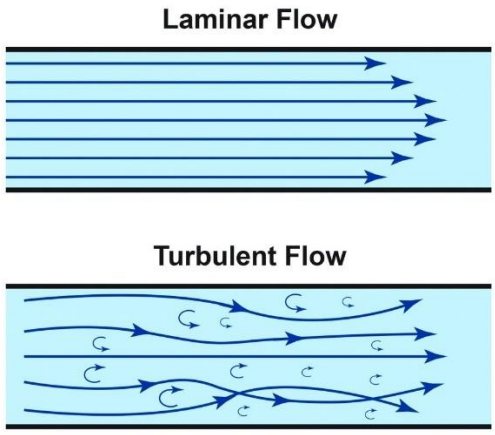



*Figura 2.1.3—2: Flujo laminar y turbulento (Osma, 2019)*

### 2.1.4. Propiedades físicas del aire

El aire, el medio a través del cual se llevan a cabo los experimentos en un túnel de viento subsónico, posee un conjunto de propiedades físicas intrínsecas que son indispensables para el estudio y la interpretación de los fenómenos aerodinámicos. Estas características, principalmente la densidad y la viscosidad, no son estáticas; de hecho, su comportamiento ante cambios en la temperatura y la presión es lo que rige el flujo del aire y, en consecuencia, el análisis del número de Reynolds. "Desde la perspectiva de la ingeniería, el aire puede ser modelado con una alta precisión como un gas ideal cuando se encuentra bajo condiciones atmosféricas estándar" (Fox, 2018).

#### 2.1.4.1. Densidad

La densidad del aire, que se define como la masa de gas contenida en una unidad de volumen, es una propiedad dinámica que responde directamente a las variaciones en la presión y la temperatura del entorno. En condiciones atmosféricas estándar a nivel del mar (una temperatura de 15 °C y una presión de 1 atmósfera), la densidad del aire se establece en aproximadamente 1.225 kg/m$^3$ (Çengel & Cimbala, 2018). Sin embargo, en el contexto de un laboratorio o un túnel de viento, es más práctico considerar la temperatura ambiente, que puede ser distinta a las condiciones estándar.

En un laboratorio con una temperatura ambiente de 25 °C, la densidad del aire disminuye ligeramente a cerca de 1.184 kg/m$^3$ . Esta variación es crucial, ya que un aire menos denso afecta las fuerzas de inercia y, por lo tanto, la dinámica del flujo. La relación entre estas variables se describe con la ecuación de estado de los gases ideales, la cual vincula la densidad con la presión y la temperatura absolutas del aire:

$$\rho = \frac{P}{RT}$$

*Ecuación 2.1.4.1—6: Ecuación de estado de gas ideal en su forma para densidad*

En esta ecuación, $P$ representa la presión absoluta del aire, $T$ la temperatura absoluta, y R es la constante específica para el aire seco, con un valor de $287.05\ {}^{J}/_{(kg \cdot K)}$. Mantener una temperatura constante en el área de trabajo es, por tanto, una estrategia fundamental para garantizar la fiabilidad y la repetibilidad de los experimentos.

#### 2.1.4.2. Viscosidad

La viscosidad es una medida de la resistencia interna de un fluido a fluir. Se puede visualizar como la fricción entre las capas adyacentes del fluido cuando se mueven unas sobre otras. Este concepto se divide en dos parámetros: la viscosidad dinámica $(\mu)$ y la viscosidad cinemática $(\nu)$.

- La viscosidad dinámica (μ), medida en Pascal-segundos $(Pa \cdot s)$, cuantifica la fuerza de cizallamiento requerida para que una capa de fluido se deslice sobre otra.
- La viscosidad cinemática $(\nu)$, medida en $m^2/_s$, es el cociente de la viscosidad dinámica y la densidad del fluido $(\nu = \mu/\rho)$. Es esta propiedad la que se utiliza de manera directa en el cálculo del número de Reynolds, lo que la convierte en un parámetro de gran importancia práctica en el campo de la aerodinámica (Çengel & Cimbala, 2018).

A diferencia de los líquidos, cuya viscosidad se reduce al aumentar la temperatura, la viscosidad de los gases, incluyendo el aire, exhibe el comportamiento opuesto: aumenta conforme la temperatura se eleva (Fox, 2018). Este fenómeno se explica a nivel molecular: a temperaturas más altas, las moléculas de gas se mueven con mayor energía cinética y colisionan con más frecuencia, generando una mayor resistencia interna al movimiento del fluido.

Para un laboratorio con una temperatura de 25 °C, la viscosidad dinámica del aire es de aproximadamente $1.849 * 10^{-5} Pa \cdot s$, mientras que la viscosidad cinemática se sitúa alrededor de $1.56 * 10^{-5}\ m^2/_S$. El conocimiento preciso de estos valores es fundamental para garantizar que los resultados de tu experimento sean exactos y validados científicamente.

## 2.2. Túneles de viento

"La visualización de flujo es una técnica fundamental en la aerodinámica experimental que permite hacer visible el comportamiento del aire alrededor de un modelo. Este método proporciona una comprensión cualitativa e intuitiva del campo de flujo, revelando patrones que no son fácilmente detectables mediante mediciones cuantitativas. La información obtenida a través de estas técnicas es crucial para analizar fenómenos complejos como la formación de la capa límite, la separación del flujo y la generación de vórtices" (Dahmani, 2018)

Este enfoque se erige como un puente entre la teoría y la práctica, ya que convierte conceptos abstractos de la mecánica de fluidos en imágenes concretas que pueden ser

analizadas visualmente. En un túnel de viento, la visualización de flujo permite a los ingenieros y científicos no solo ver el resultado final, sino también comprender el proceso dinámico que lleva a la formación de las fuerzas aerodinámicas. Es una herramienta indispensable tanto para la investigación como para la docencia, facilitando la identificación de ineficiencias en el diseño y la validación de modelos computacionales.

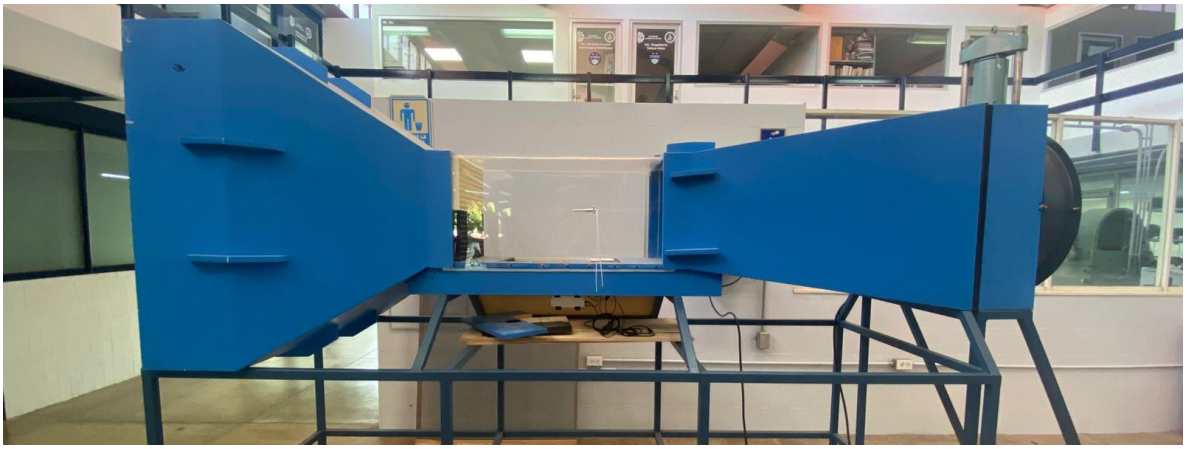


*Figura 2.2—3: Túnel de viento subsónico en el Tecnológico Nacional de México, campus Culiacán*

### 2.2.1. Métodos de visualización de flujo en túnel de viento subsónico

Existen varios métodos para visualizar el flujo en un túnel de viento subsónico, cada uno con sus propias ventajas y aplicaciones específicas. Algunos de los más relevantes incluyen:

- Técnica del humo: "Este método, de gran relevancia para tu proyecto, utiliza la inyección de humo o niebla para trazar las líneas de corriente del flujo. El humo es generado por vaporización de aceites minerales o glicerina y se introduce en el flujo de aire a través de un peine o difusor. Al iluminar el humo con una luz estroboscópica o un láser, se pueden observar y fotografiar los patrones del flujo. Esta técnica es especialmente útil para estudiar la separación del flujo, la estela y la formación de vórtices alrededor de cuerpos de forma irregular" (Hassan M. A., 2015). La principal ventaja de esta técnica es su capacidad para visualizar el campo

de flujo completo en dos dimensiones, proporcionando una imagen instantánea de cómo se comporta el aire alrededor del objeto.

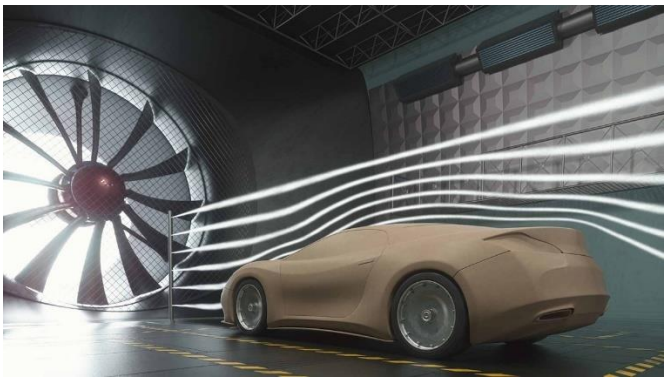


*Figura 2.2.1—4: Técnica de humo en túnel de viento (Frederiksen, 2023)*

- Técnica de hilos): "Este método consiste en colocar pequeños hilos de lana o nylon sobre la superficie del modelo. La orientación y el movimiento de los hilos indican la dirección y la calidad del flujo en la capa límite. Si bien es una técnica simple y de bajo costo, su principal limitación es que no permite la visualización de las líneas de corriente en el campo libre del flujo." A pesar de su simplicidad, esta técnica es muy efectiva para identificar rápidamente áreas de separación del flujo y transiciones de flujo laminar a turbulento sobre la superficie de un ala o cualquier otro modelo.
- Visualización con aceite o tinte: "Esta técnica se utiliza para estudiar el patrón de flujo en la superficie del modelo. Se aplica una mezcla de aceite y un pigmento de color sobre la superficie, y al encender el túnel de viento, el flujo de aire arrastra el aceite, creando patrones que revelan las líneas de corriente superficiales, los puntos de separación y los puntos de reincorporación del flujo." Este método es ideal para mapear de manera detallada las líneas de flujo en la capa límite, proporcionando una imagen estática y permanente del comportamiento del fluido en la superficie del modelo, lo que facilita el análisis posterior.




*Figura 2.2.1—5: Técnica de tinte en estudios aerodinámicos en formula 1 (Marca, 2024)*

### 2.2.2. Importancia de la visualización de flujo en la aerodinámica

"La visualización de líneas de corriente mediante humo es una técnica crucial para comprender campos de flujo complejos en este entorno, revelando detalles como la separación de la capa límite, la formación de vórtices y la extensión de la estela" (Ponzoni, Montenegro, Ganiele, Attorresi, & & Caccia, 2024)

La visualización de flujo no solo permite una comprensión cualitativa y un análisis visual de los fenómenos aerodinámicos, sino que también es una herramienta valiosa para validar y complementar los datos obtenidos de mediciones cuantitativas. La implementación de un sistema de visualización de humo, como el que se propone en este proyecto, es un paso fundamental para llevar a cabo este tipo de análisis de manera eficiente y precisa, permitiendo la identificación de áreas problemáticas en un diseño aerodinámico y la optimización de sus características.

"La visualización del flujo, en especial a través del uso de humo, es una herramienta esencial para el análisis aerodinámico, ya que permite comprender el comportamiento del campo de flujo y revelar fenómenos complejos como la separación de la capa límite, la formación de vórtices y la extensión de la estela" (Hassan M. A., 2015).

### 2.3. Matriz Ortogonal Taguchi L8

El diseño de experimentos (DOE) es una metodología sistemática que permite optimizar procesos y productos mediante la evaluación de múltiples factores y sus interacciones. Dentro de esta metodología, los métodos Taguchi ofrecen una aproximación robusta para la optimización de parámetros, incluso con un número reducido de experimentos. Una de las herramientas fundamentales en esta aproximación es el uso de matrices ortogonales, que garantizan una distribución balanceada de los factores de control a lo largo de las pruebas, minimizando el número de corridas experimentales necesarias (Gutiérrez-Pulido, 2016).

Para el propósito de este proyecto, se ha seleccionado la Matriz Ortogonal Taguchi L8. La designación "L8" indica que se realizarán un total de 8 corridas experimentales. Esta matriz es especialmente adecuada para un diseño con hasta siete factores, cada uno con dos niveles (alto y bajo), lo que la convierte en una herramienta eficiente para evaluar la influencia de variables clave en el rendimiento del difusor de humo. La matriz L8 es un diseño fraccional factorial que permite identificar los efectos principales de los factores de manera independiente, sin la confusión de las interacciones entre ellos.

La tabla 2—1 presenta la estructura de la matriz L8, donde cada columna representa un factor y cada fila una corrida experimental. El nivel "1" denota el valor bajo del factor y el nivel "2" el valor alto.

| Corrida | Factor A | Factor B | Factor C | Factor D | Factor E | Factor F | Factor G |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| **2** | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| **3** | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **4** | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| **5** | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| **6** | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| **7** | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| **8** | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |

*Tabla 2—1: Matriz ortogonal L8*

# 3. DESCRIPCION DE LAS ACTIVIDADES

## 3.1. Definición de diseño

Dado a que vamos a utilizar una matriz ortogonal Taguchi L8, vamos a definir al menos 6 variables las cuales se consideran criticas para poder variar tanto en la presión y velocidad dentro del modelo. Para ello usaremos los principios de Bernoulli y a su vez el de los tubos de Venturi. La velocidad de salida la usaremos para poder definir el número de Reynolds y con ello poder obtener el rendimiento de dicho modelo.

Dado a que se harán 8 modelos diferentes, en cada variable que consideremos dentro del diseño deberán tener 2 niveles. Esto para poder aplicar la tabla y que cada modelo pueda ser diferente. Sin embargo, dado a que solo usaremos 2 niveles existirá la posibilidad de que algunos modelos se asemejen entre sí, sin embargo, no serán iguales.

Al final, se analizará cada uno de dichas variables en el software de Minitab, y este nos dará un análisis de las variables más a la menos critica. Por lo que esto será de vital importancia para poder generar un modelo optimo y a su vez para darnos una orientación sobre las magnitudes de cada variables, ya sea si entre mayor sea una variable es mejor o no. Aunque también existe la posibilidad de que las variables tengan una magnitud cuantificable, si no que sea por medio de su cualidad, también llamado tipo A y tipo B, las cuales sean variables estipuladas conforme a su cualidad y su justificación de ser la cual será diferente a la del otro tipo.

### 3.1.1 Variables para considerar

Para el diseño de los inyectores de humo, se tuvo como idea principal un modelo el cual pueda almacenar dentro de sí mismo todo el humo y que este por medio del empuje mismo del sistema que inyecta el humo pueda generar una fuerza para que el humo salga por medio de los canales integrados al cuerpo del elemento de almacenamiento; sin embargo, aunque la presión de salida era elevada, la velocidad no era muy prometedora, por lo que el Reynolds en cuestión era muy elevado. Es por ello por lo que se tomó en cuenta los principios de las

ecuaciones de Bernoulli *(Ecuación 2—1)*, ya que establece que la presión es inversamente proporcional a la salida, y un ejemplo claro de ello son los tubos de Venturi, por lo que se decidió integrar en los inyectores de salida del dispositivo los tubos de Venturi.

Ya que se decidió el modelo que se deseaba obtener y su propósito, se definió la filosofía de diseño; es por ello por lo que se optó un diseño por medio de una matriz ortogonal Taguchi L8, ya que esta matriz me permite usar de 6 a 7 de variables y definir 2 tipos de cada una de ellas y nos ayudara a generar 8 tipos diferentes de modelos. Para el uso de esta matriz, usamos una licencia de 30 días de prueba del software Minitab. Este software nos ayudara a generar un modelo optimo, y ese modelo se diseñará y se estudiara para corroborar el desempeño de este modelo. En este caso en particular, lo que nos definirá si el modelo es óptimo o no es el número de Reynolds.

Para poder definir las variables que deben de tener los modelos, no solo se tomaron en cuenta los principios que establece la ecuación de Bernoulli; si no también los principios de la ecuación de numero de Reynolds *(ecuación 2—5)*, ya que lo que nos interesa es el control de dicho número. Sin embargo, podemos destacar que en dicha ecuación se toma en cuenta la sección lineal del canal por donde está pasando el flujo en cuestión; por lo que debemos de tomar en cuenta cual será la sección lineal de la parte de estrangulación del tubo de Venturi para poder aplicarla directamente a la ecuación de numero de Reynolds y poder determinar la caracterización del modelo.

Ya que tenemos definido que debemos de tomar en cuenta la sección lineal del tubo, debemos tomar en consideración si tener una sección linear mayor es mejor, menor es mejor o si tiene que ser estandarizada; para definir el diseño tenemos que considerar los siguientes aspectos:

- Un modelo el cual pueda contener dentro de sí mismo el fluido el cual se desea utilizar para las pruebas en el túnel de viento, en este caso en particular puede ser tanto humo como aire.
- Se busca poder medir la presión estática dentro de la sección donde se va a inyectar y almacenar dicho fluido para su estudio.

- Así mismo, se busca variar la presión estática, por lo que tenemos que variar la capacidad volumétrica dentro del modelo.
- Aplicación de tubos de Venturi para poder variar la presión y velocidad de extracción del fluido en cuestión. Esto implica variar en tres zonas esenciales del tubo de Venturi:
    - Entrada cónica.
    - Salida cónica.
    - Diámetro de estrangulación del tubo de Venturi.
- Por último, también tomaremos en cuenta la cantidad de salidas de extracción de humo. Esto está relacionado al número de tubos de Venturi que se usaran.

Por ello es que las variables que usaremos son:

- Alcance de las entradas cónicas de los tubos de Venturi
- Salidas cónicas de los tubos de Venturi
- Radio de garganta de los tubos de Venturi
- Diámetro interno del dispositivo de almacenamiento
- Propiedades internas del dispositivo de almacenamiento
- Numero de salidas con tubos de Venturi

#### 3.1.1.1. Alcance de las entradas cónicas de los tubos de Venturi

En términos generales, los tubos de Venturi poseen como característica fundamental la reducción progresiva del diámetro en su sección de entrada, lo que provoca una disminución en la presión y, de manera simultánea, un incremento en la velocidad del fluido que circula a través de ellos. Esta propiedad es la base de su funcionamiento y constituye uno de los principios más utilizados en la dinámica de fluidos para controlar el comportamiento del flujo.

No obstante, en el presente proyecto se optó por modificar dicho criterio con el propósito de analizar alternativas de diseño que respondieran mejor a las condiciones específicas del inyector de humo. Dado que el tubo de Venturi se encuentra directamente

acoplado al cuerpo de almacenamiento, se consideró necesario introducir variaciones en el alcance de la entrada cónica.

Para ello, se definieron dos configuraciones posibles: la primera corresponde a un diseño en el cual la reducción del diámetro inicia desde la superficie de la pared del cuerpo del extractor; mientras que la segunda consiste en prolongar la entrada cónica hacia el interior, de manera que la reducción del diámetro alcance aproximadamente la mitad del cuerpo del extractor.

Estas dos variantes de diseño permiten evaluar la influencia de la geometría de la entrada cónica en la distribución de presiones, en la velocidad de salida y, en última instancia, en el número de Reynolds, lo que resulta determinante para establecer si el flujo obtenido se aproxima a un régimen laminar o turbulento (Figura 3—1).

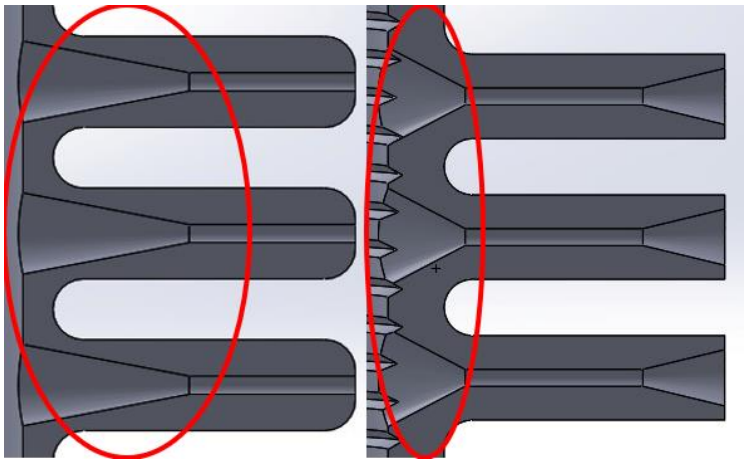


*Figura 3.1.1.1—1: Alcance de la entrada cónica extendida y a la altura de la pared*

#### 3.1.1.1.1. Tipos de alcances

La entrada cónica constituye la zona de transición entre el espacio de almacenamiento del flujo y el inicio del tubo de Venturi, por lo que su geometría resulta determinante en la manera en que el fluido ingresa hacia la garganta. Con el fin de evaluar el efecto de esta sección, se decidió considerar dos configuraciones de carácter cualitativo.

En el Tipo 1, la entrada cónica se encuentra alineada con la pared superficial del dispositivo de almacenamiento, de modo que la reducción del diámetro comienza desde el límite del cuerpo. En el Tipo 2, la entrada cónica se prolonga hacia el interior, alcanzando aproximadamente la mitad del diámetro del tubo de Venturi. Esta segunda configuración genera una sección lineal menor en la garganta, lo cual se traduce en una modificación significativa de las condiciones de presión y velocidad del flujo al atravesar dicha zona de estrangulamiento.

La comparación entre ambas variantes permite determinar cuál geometría de entrada cónica ofrece un mejor desempeño en términos de estabilidad del flujo y control del número de Reynolds.

#### 3.1.1.2. Salidas cónicas de los tubos de Venturi

En el caso de la salida del tubo de Venturi, se contempla una sección cónica cuya función principal es ampliar nuevamente el diámetro después de la zona de estrangulamiento. Este ensanchamiento progresivo permite recuperar parte de la presión perdida en la aceleración del flujo, así como favorecer una salida más uniforme del fluido. De esta manera, la geometría de salida complementa el efecto de la entrada cónica, otorgándole al Venturi su característica configuración.

Para el diseño de las salidas cónicas se estableció que el diámetro de expansión debía ser, en promedio, cinco veces mayor que el diámetro de la garganta. Esta relación geométrica resulta fundamental, ya que asegura que el fluido se expanda de manera gradual y controlada, evitando la formación de turbulencias excesivas o pérdidas energéticas que pudieran comprometer la estabilidad del flujo.

En este proyecto, se evaluaron dos configuraciones: una sin salida cónica (en la cual el flujo se libera directamente después de la garganta), y otra con salida cónica diseñada conforme a la proporción antes mencionada. Estas dos variantes de diseño fueron consideradas dentro de las variables experimentales, con el fin de analizar su impacto sobre la velocidad, la presión y la caracterización final del flujo en el inyector de humo (Figura 3—2).

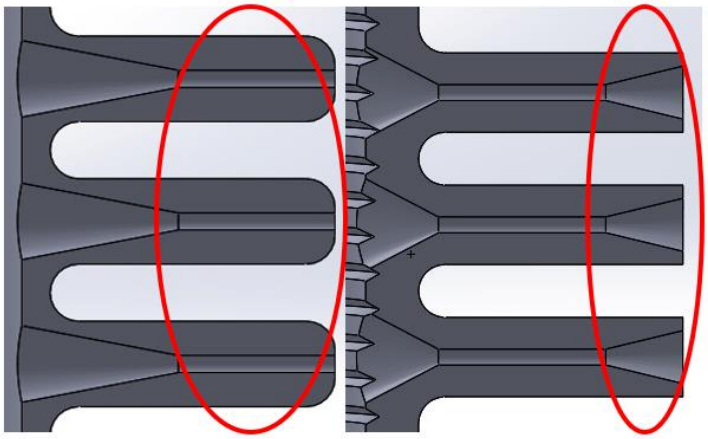


*Figura 3.1.1.2—2: Alcance de la salida cónica sin cañón y con cañón*

#### 3.1.1.2.1. Tipos de salidas

En esta sección se analiza el uso del denominado cañón, un componente que permite reducir el diámetro de estrangulación del flujo en la zona de salida del tubo de Venturi. La incorporación de este elemento influye directamente en la dirección y concentración del flujo, así como en la uniformidad de las líneas de humo generadas.

Para el diseño se definieron dos tipos de variables cualitativas: el Tipo 1, que corresponde a la salida sin cañón, donde el flujo se libera directamente tras la garganta; y el Tipo 2, que contempla una salida con cañón, diseñada para concentrar y guiar el flujo de manera más controlada.

La inclusión de estas dos configuraciones permitirá evaluar cómo la presencia o ausencia del cañón afecta la distribución del flujo, la presión dinámica en la salida y la calidad de las líneas de humo utilizadas para caracterizar el comportamiento del flujo alrededor del objeto en estudio. Esta diferenciación resulta fundamental para optimizar el diseño del inyector de humo y garantizar resultados experimentales más precisos.

### 3.1.1.3. Radio de garganta del tubo de Venturi

La garganta del tubo de Venturi constituye la sección de menor diámetro del conducto y, por lo tanto, es la zona en la que se producen los cambios más significativos en las condiciones del flujo. De acuerdo con los principios de la dinámica de fluidos, una disminución en la capacidad volumétrica en esta sección provoca un aumento en la velocidad del fluido, acompañado de una reducción en la presión. Dicho fenómeno responde directamente a la relación inversa entre presión y velocidad establecida en la ecuación de Bernoulli.

En este proyecto, se decidió variar el diámetro de la garganta con el objetivo de observar y cuantificar cómo esta modificación geométrica influye en el comportamiento del flujo. Específicamente, se busca evaluar el impacto de diferentes radios de garganta en la distribución de presión estática, en el incremento de la velocidad del aire y en la determinación del número de Reynolds.

El análisis de esta variable resulta fundamental, ya que un radio de garganta reducido puede favorecer la aceleración del flujo, pero al mismo tiempo incrementar el riesgo de turbulencia; mientras que un diámetro mayor podría estabilizar el régimen de salida, aunque a costa de reducir la velocidad alcanzada. Por lo anterior, la variación de esta dimensión se consideró como un factor crítico dentro del diseño experimental de los inyectores de humo (Figura 3—3).

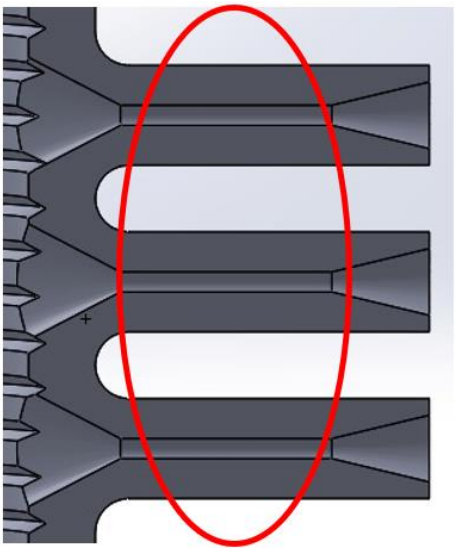


*Figura 3.1.1.3—3: Garganta de los tubos de Venturi*

#### 3.1.1.3.1. Tipos de Radios de garganta

Considerando que la entrada cónica que conduce el flujo hacia el tubo de Venturi posee un diámetro de 10 mm, resulta indispensable definir la diferencia entre dicho valor y el diámetro de la garganta del tubo, ya que esta relación geométrica influye directamente en la aceleración del fluido y en la caída de presión que se produce en la zona de estrangulamiento.

Con este objetivo, se establecieron dos niveles de variación: el Tipo 1, correspondiente a una diferencia de 0.5 mm, y el Tipo 2, con una diferencia reducida de 0.3 mm respecto al diámetro de entrada. De esta manera, se busca evaluar cómo una garganta más angosta o amplia modifica las condiciones de presión y velocidad en el flujo, lo cual impacta de manera directa en el número de Reynolds y en la clasificación del régimen resultante (laminar o turbulento).

### 3.1.1.4. Diámetro Interno del dispositivo de almacenamiento

El diámetro interno del dispositivo de almacenamiento desempeña un papel esencial en el comportamiento del flujo dentro del inyector, ya que determina tanto la capacidad volumétrica del sistema como la magnitud de la presión estática que puede generarse en su

interior. Cuanto mayor es el diámetro del cuerpo, mayor es el volumen disponible para la acumulación de humo, lo que a su vez influye en la presión máxima alcanzable antes de que el fluido sea conducido hacia las salidas.

En este espacio se inyecta directamente el humo, que permanece contenido hasta que la presión interna lo impulsa hacia los canales conectados a los tubos de Venturi. De este modo, el diámetro interno no solo regula la cantidad de fluido que puede almacenarse, sino también la estabilidad de la presión ejercida sobre dicho fluido al momento de su liberación.

La variación de esta dimensión permite analizar cómo diferentes volúmenes internos afectan el equilibrio entre presión estática y dinámica, lo cual se refleja en la velocidad y distribución del flujo a la salida. Por esta razón, el diámetro interno fue definido como una de las variables de diseño más relevantes dentro del presente estudio (Figura 3—4).

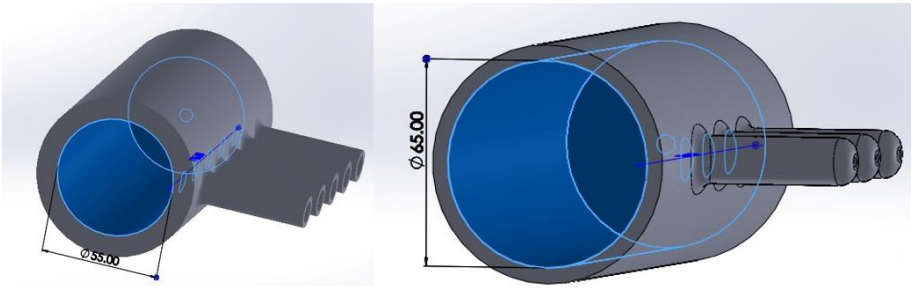



*Figura 3.1.1.4—4: Diámetro interno del dispositivo de almacenamiento*

#### 3.1.1.4.1. Tipos de diámetros internos del dispositivo de almacenamiento

Con el propósito de analizar la influencia del diámetro interno en el comportamiento del flujo, se estableció una variación de 10 mm entre los modelos a diseñar. Esta diferencia dimensional permite evaluar de qué manera el volumen disponible para el almacenamiento del humo afecta la presión estática generada en el interior del dispositivo.

Para tal efecto, se definieron dos niveles de la variable: el Tipo 1, correspondiente a un diámetro interno de 65 mm, y el Tipo 2, con un diámetro reducido de 55 mm. La comparación entre ambos escenarios permite determinar cómo la capacidad volumétrica del contenedor

influye en la estabilidad de la presión y, en consecuencia, en la eficiencia con la que el humo es impulsado hacia los canales de salida (Figura 3—4).

#### 3.1.1.5. Propiedades internas del dispositivo de almacenamiento

El propósito de modificar las propiedades internas del dispositivo de almacenamiento es mejorar la distribución del flujo de humo antes de que este sea conducido hacia los canales de salida. Para ello, se plantea la incorporación de un enroscado en la superficie interna del cuerpo, con el objetivo de redirigir el movimiento del fluido y lograr que se desplace de manera más uniforme a lo largo de las paredes. De esta forma, se busca evitar concentraciones irregulares de presión y favorecer que el humo se canalice de forma más equilibrada hacia los tubos de Venturi (Figura 3—5).



*Figura 3.1.1.5—5: Interior del dispositivo de almacenamiento con enroscado y sin enroscado*

##### 3.1.1.5.1. Tipo de propiedades internas

El objetivo de definir y modificar las propiedades internas del dispositivo de almacenamiento es optimizar la distribución del flujo de humo antes de su conducción hacia los canales de salida. Para lograrlo, se consideran dos configuraciones cualitativas: el Tipo 1, que incorpora un enroscado en la superficie interna, diseñado para redirigir el movimiento del

fluido y asegurar un desplazamiento más uniforme a lo largo de las paredes; y el Tipo 2, que carece de enroscado, ofreciendo un diseño más simple y directo, con menor complejidad de manufactura.

La inclusión del enroscado interno (Tipo 1) busca evitar concentraciones irregulares de presión y favorecer que el humo se canalice de manera equilibrada hacia los tubos de Venturi, mejorando la eficiencia del sistema. Por su parte, el Tipo 2 permite evaluar el comportamiento del flujo en una configuración básica, sirviendo como referencia para comparar los efectos de la modificación interna en términos de distribución de flujo y desempeño general del dispositivo.

#### 3.1.1.6. Numero de salidas con tubos de Venturi

Finalmente, se consideró como variable de diseño la cantidad de canales de salida del dispositivo. La variación en el número de salidas permite modificar tanto la presión estática acumulada en el interior del almacenamiento como la presión dinámica ejercida en el momento de la expulsión del humo.

Además de su influencia en la presión interna, esta variable cumple un propósito funcional dentro de las pruebas aerodinámicas. Al disponer de diferentes cantidades de salidas, es posible generar varias líneas de humo simultáneas, las cuales impactan directamente en el modelo colocado dentro del túnel de viento. Dichas líneas de humo facilitan la visualización del comportamiento del flujo alrededor del objeto en estudio, que constituye el objetivo principal del dispositivo.

Por lo tanto, el número de salidas con tubos de Venturi no solo afecta el desempeño interno del sistema, sino también la calidad de la información experimental obtenida en la caracterización aerodinámica

##### 3.1.1.6.1. Variación de cantidades

Tal como se mencionó anteriormente, el objetivo principal de este apartado es generar líneas de humo controladas, que impacten de manera precisa sobre la pieza que se esté

evaluando en el túnel de viento. Para analizar el efecto del número de canales de salida, se definieron dos tipos de variables cualitativas:

El Tipo 1 corresponde a un diseño con cinco salidas conectadas a tubos de Venturi, lo que permite distribuir el humo de manera más uniforme sobre la superficie del objeto. Esta configuración facilita la visualización de múltiples líneas de flujo simultáneas, proporcionando una mayor cobertura y detalle en la caracterización aerodinámica.

El Tipo 2 contempla un diseño con tres salidas, ofreciendo un flujo más concentrado y limitado a zonas específicas de la pieza. Esta disposición permite evaluar cómo la reducción en el número de canales influye en la presión interna del dispositivo, la dinámica de expulsión del humo y la definición de las líneas de flujo alrededor del modelo.

La inclusión de estas dos configuraciones como variables experimentales permitirá determinar cuál es la disposición óptima de salidas para maximizar la calidad de la información obtenida y asegurar un desempeño estable del sistema durante las pruebas.

### 3.1.2. Aplicación de matriz ortogonal para modelos a diseñar

En la tabla *3*— podemos observar todas las variables y sus tipos ya definidos. Estos tipos 1 y 2 serán interpretados en la tabla *3*— y con eso ya sabremos las especificaciones de cada uno de los modelos.

| | VARIABLES | TIPO | |
|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 |
| A | Diámetro de entrada aire-humo | 65 mm | 55 mm |
| B | Diferencia de diámetro de extractor | 0.5 | 0.3 |
| C | Alcance de la entrada cónica | Altura Pared | 50% |
| D | Enroscado | Si | No |
| E | Numero de salidas | 5 | 3 |
| F | Cañón | No | Si |

*Tabla 3.1.2—1: Variables de diseño y sus 2 tipos.*

### 3.1.2.1. Características de modelo 1

En la tabla 3— tenemos la configuración que debe de tener nuestro modelo 1. Este caso en particular podemos observar que todas las variables de diseño son de nivel 1. Esto nos dará como resultado a $Y_{1.}$

| MATRIZ ORTOGONAL L8 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| NUMERO | A | B | C | D | E | F | RESULTADOS |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Y |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | Y1 |

*Tabla 3.1.2.1—2: Variables de diseño de modelo 1*

### 3.1.2.2. Características de modelo 2

En la tabla 3— tenemos la configuración que debe de tener nuestro modelo 2. Para ello podemos notar que las variables D, E y F serán de nivel 2, lo que significa que dicho modelo tendrá una variación de diseño del 50% entre los niveles 1 y 2. Con ello obtendremos el resultado $Y_{2.}$

| MATRIZ ORTOGONAL L8 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| NUMERO | A | B | C | D | E | F | RESULTADOS |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Y |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | Y2 |

*Tabla 3.1.2.2—3: Variables de diseño de modelo 2*

### 3.1.2.3. Características de modelo 3

En la tabla 3— tenemos la configuración que debe de tener nuestro modelo 3. Así como el modelo 2, tiene una variación del 50% entre los niveles 1 y 2, solo que las variables de nivel 2 serán para las variables B, C y F. Esto nos ayudara a obtener el resultado $Y_{3.}$

| MATRIZ ORTOGONAL L8 |
|---|

| NUMERO | A | B | C | D | E | F | RESULTADOS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Y |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | Y3 |

*Tabla 3.1.2.3—4: Variables de diseño de modelo 3*

### 3.1.2.4. Características de modelo 4

Como podemos apreciar en la tabla 3— tenemos la configuración correspondiente para el modelo 4. En este caso, la mayoría de las variables son de nivel 2, a excepción de las variables A y F.

| MATRIZ ORTOGONAL L8 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| NUMERO | A | B | C | D | E | F | RESULTADOS |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Y |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | Y4 |

*Tabla 3.1.2.4—5: Variables de diseño de modelo 4*

### 3.1.2.5. Características de modelo 5

Como podemos apreciar en la tabla 3— observamos que por primera vez la variable A tiene el nivel 2, así mismo, las variables C y E. Por otro lado, las variables B, D y F conservan los niveles 1. Con ello obtendremos el resultado de $Y_{5.}$

| MATRIZ ORTOGONAL L8 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| NUMERO | A | B | C | D | E | F | RESULTADOS |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Y |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | Y5 |

*Tabla 3.1.2.5—6: Variables de diseño de modelo 5*

### 3.1.2.6. Características de modelo 6

En la tabla 3— tenemos que las únicas dos variables de nivel 1 son la B y la E. Por otro lado, las variables A, C, D y F serán de nivel 2. Con esa configuración obtendremos $Y_6$.

| MATRIZ ORTOGONAL L8 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| NUMERO | A | B | C | D | E | F | RESULTADOS |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Y |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | Y6 |

*Tabla 3.1.2.6—7: Variables de diseño de modelo 6*

### 3.1.2.7. Características de modelo 7

La configuración mostrada en la tabla 3— tenemos que las variables C y D son de nivel 1, por otro lado, las variables A, B, E y F son de nivel 2. Con ello obtendremos $Y_7$.

| MATRIZ ORTOGONAL L8 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| NUMERO | A | B | C | D | E | F | RESULTADOS |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Y |
| 7 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | Y7 |

*Tabla 3.1.2.7—8: Variables de diseño de modelo 7*

### 3.1.2.8. Características de modelo 8

Siendo la última configuración, tabla 3— muestra que las variables C, E y F son de nivel 1 y las variables A, B y D son de nivel 2. Así, obtendremos el ultimo resultado, $Y_8$, para poder completar la matriz y poder ingresar todos los resultados con las configuraciones en Minitab.

| MATRIZ ORTOGONAL L8 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| NUMERO | A | B | C | D | E | F | RESULTADOS |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Y |
| 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | Y8 |

*Tabla 3.1.2.8—9: Variables de diseño de modelo 8*

## 3.2. Diseño de modelos en software CAD

Una vez definidas las variables de diseño y establecidas las configuraciones experimentales, se procedió a la modelación digital de los prototipos utilizando el software

SolidWorks. En esta etapa, cada modelo fue construido en detalle para posteriormente ser exportado en formato STL, lo que permite su fabricación mediante técnicas de manufactura asistida por computadora.

Este punto constituye una fase crítica dentro del proyecto, ya que durante la modelación en CAD no solo se materializan las decisiones tomadas en la etapa de diseño conceptual, sino que también se identifican los aspectos geométricos más relevantes que podrían influir en la manufactura y en el desempeño de los modelos. De esta manera, la construcción digital sirve como una herramienta de verificación previa, al anticipar posibles complicaciones de fabricación y optimizar las características de cada prototipo.

Adicionalmente, se tomaron en cuenta las denominadas variables libres, es decir, aquellos parámetros que, si bien no forman parte directa de las variables experimentales, deben mantenerse constantes en todos los modelos para asegurar condiciones de comparación homogéneas. En este caso, se estableció una profundidad del dispositivo de almacenamiento de 135 mm, una altura total de 150 mm y una longitud fija de 50 mm para los tubos de Venturi. Estos valores se definieron con el propósito de otorgar estabilidad estructural a los diseños y garantizar que las variaciones observadas en las pruebas se deban únicamente a los factores experimentales seleccionados.

En las Figuras 3—6 a 3—13 se presentan los ocho modelos generados en SolidWorks, los cuales corresponden a la matriz ortogonal previamente definida y constituyen la base para la fase de manufactura y posterior validación experimental.

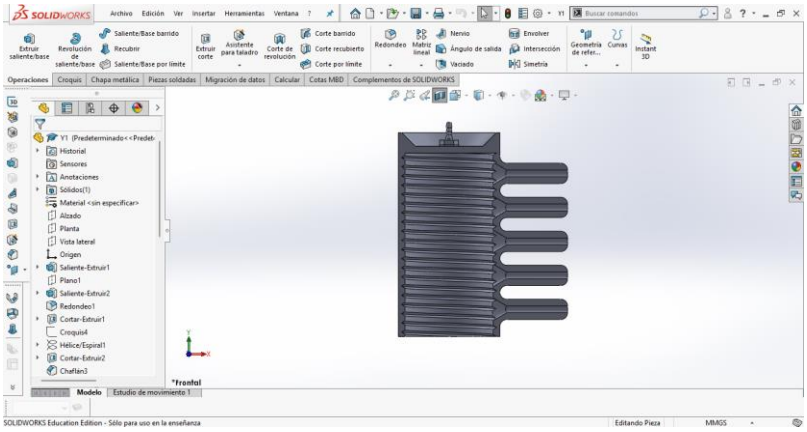


*Figura 3.2—6: Diseño en SolidWorks del modelo 1*

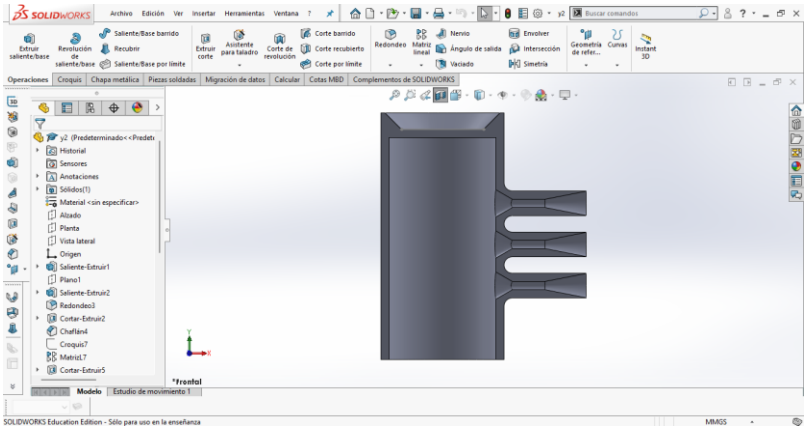


*Figura 3.2—7: Diseño en SolidWorks del modelo 2*

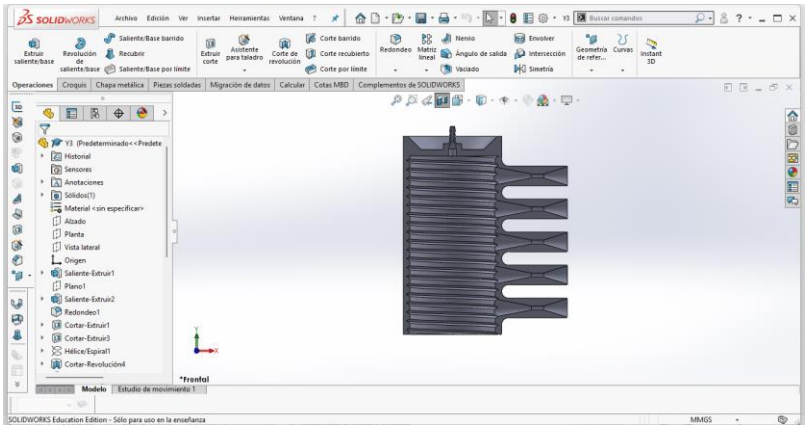


*Figura 3.2—8: Diseño en SolidWorks del modelo 3*

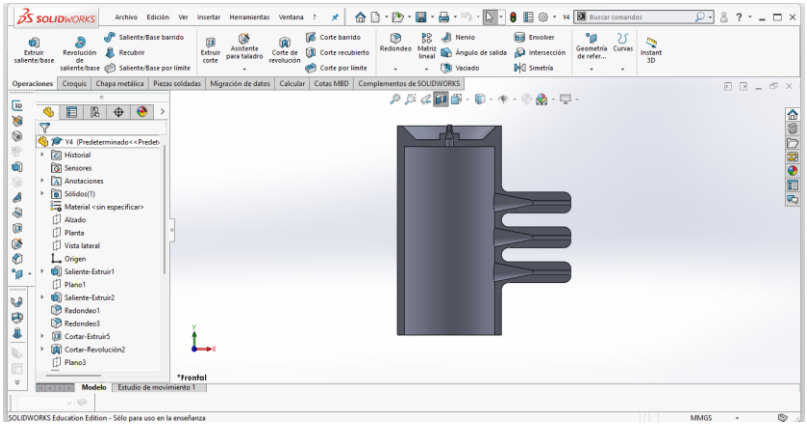


*Figura 3.2—9: Diseño en SolidWorks del modelo 4*

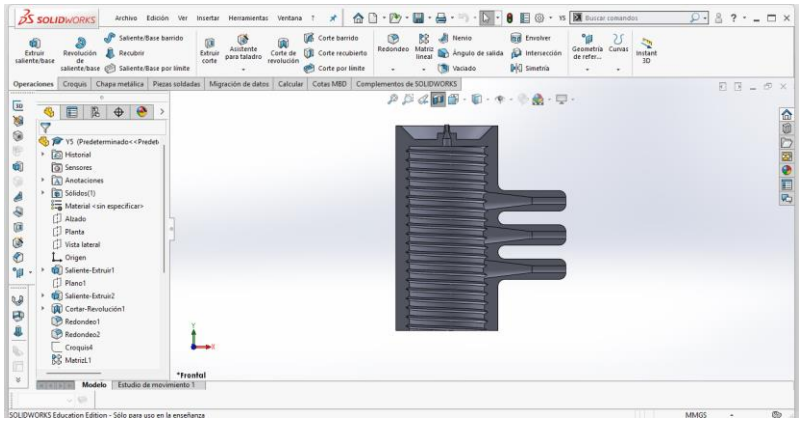


*Figura 3.2—10: Diseño en SolidWorks del modelo 5*

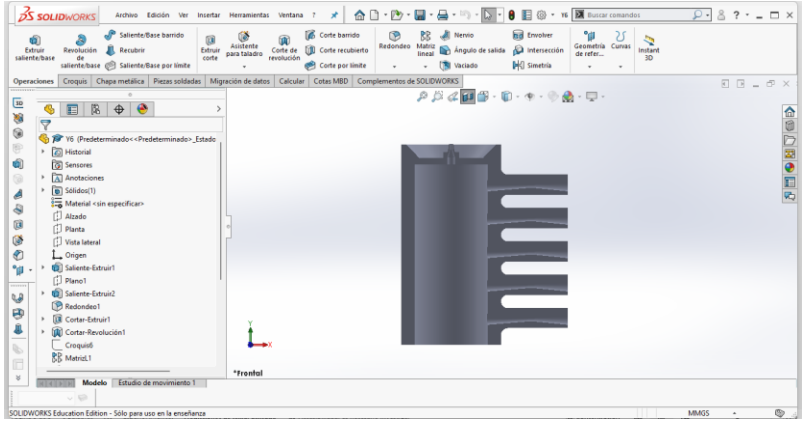


*Figura 3.2—11: Diseño en SolidWorks del modelo 6*

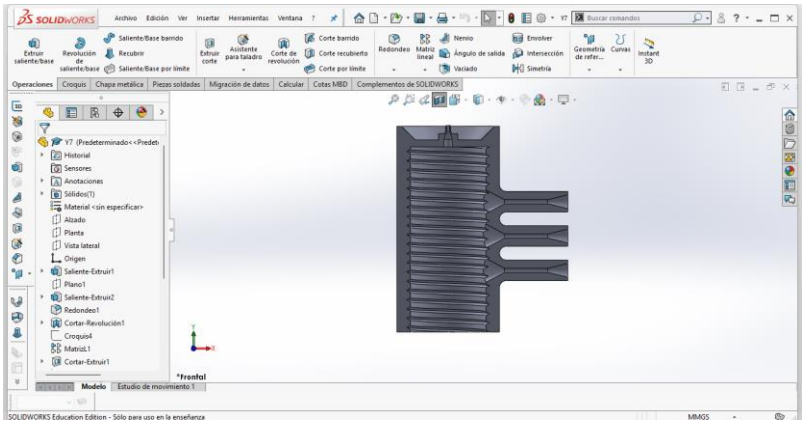


*Figura 3.2—12: Diseño en SolidWorks del modelo 7*

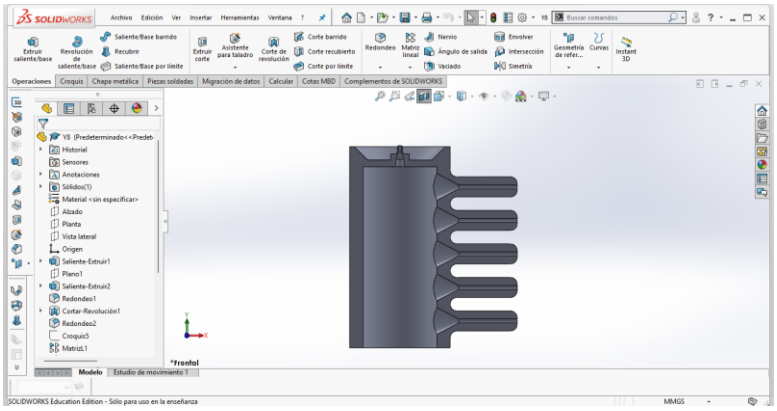


*Figura 3.2—13: Diseño en SolidWorks del modelo 8*

### 3.3. Manufactura de modelos

Para la fabricación de los prototipos diseñados, se optó por la tecnología de impresión 3D, ya que ofrece ventajas significativas en términos de precisión dimensional, facilidad de uso y control de los parámetros de manufactura. Una de sus principales fortalezas es la capacidad de estimar el tiempo de impresión antes de iniciar el proceso, lo cual facilita la planeación y gestión de los recursos.

Como podemos observar en la figura 3—14, en este proyecto se utilizaron dos impresoras Creality Ender-3 S1 Pro, debido a su compatibilidad con distintos materiales de impresión y a la confiabilidad en la calidad de sus resultados. Para preparar los archivos, se

empleó el software UltiMaker Cura, que permite seleccionar el modelo de impresora, establecer los ajustes de manufactura y generar el código necesario para las máquinas. Este programa trabaja con el lenguaje de control G-Code, por lo que, una vez configurados los parámetros, se exportan los archivos en dicho formato y se transfieren a las impresoras.



*Figura 3.3—14:Impresora 3D Creality Ender-3 S1 Pro*

Tal como se observa en la Figura 3—15, el primer paso consiste en importar el modelo tridimensional al software UltiMaker Cura, donde se pueden visualizar sus dimensiones, orientación y disposición sobre la cama de impresión.

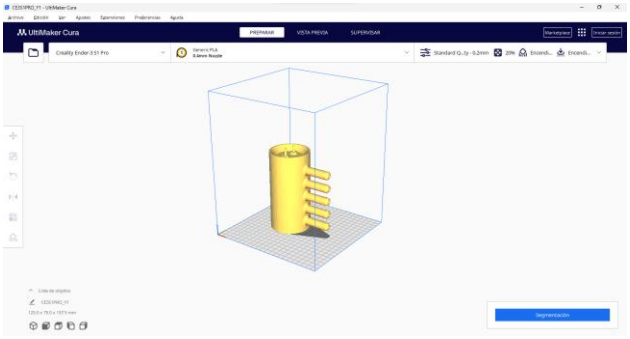



*Figura 3.3—15: Importación del modelo al software UltiMaker Cura*

Los modelos fueron previamente exportados en formato .stl desde el software CAD y posteriormente importados a UltiMaker Cura. Una vez cargados, se procedió a configurar las condiciones de impresión, entre las que se incluyen:

- El tipo de relleno (con una densidad del 20%).

- La definición de soportes tipo árbol, colocados en las zonas críticas del modelo.
- La activación de una base de adherencia para mejorar la fijación de la pieza a la cama de impresión y prevenir errores durante el proceso.

En la Figura 3—16 se muestran los ajustes de impresión configurados en el software, donde se pueden apreciar los parámetros seleccionados para garantizar estabilidad y calidad en la fabricación de cada pieza.

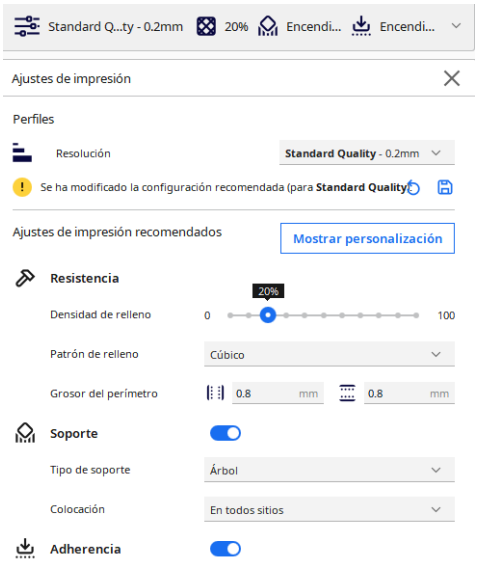



*Figura 3.3—16: Ajustes de impresión*

Posteriormente, se procedió a la segmentación de las piezas, etapa en la que el software genera el código de impresión y ofrece una vista previa de cómo se construirá la pieza capa por capa. Esta simulación permite verificar la correcta colocación de soportes y la adherencia de la base antes de iniciar la fabricación física. Asimismo, UltiMaker Cura proporciona un tiempo estimado de impresión, que para los modelos desarrollados en este proyecto osciló entre 23 y 26 horas, dependiendo de la complejidad geométrica de cada diseño. Dicho proceso puede apreciarse en la Figura 3—17, donde se muestra la vista previa de la pieza y la estimación de tiempo de producción.

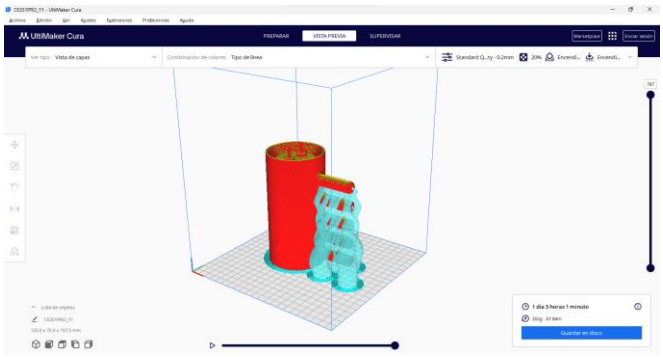



*Figura 3.3—17: Vista previa de impresión en UltiMaker Cura*

Finalmente, los archivos fueron exportados a las tarjetas de memoria de las impresoras para iniciar el proceso de manufactura. Durante los primeros 30 minutos de impresión, se realizó una inspección detallada del funcionamiento de la máquina, retirando residuos de filamento y asegurando la correcta adhesión del material. Esta supervisión inicial resultó crucial para garantizar la calidad del modelo final y evitar pérdidas de tiempo o material durante el proceso.

## 3.4. Método de pruebas

El desempeño de los prototipos fabricados fue evaluado mediante una serie de pruebas experimentales cuidadosamente planificadas. Estas pruebas tuvieron como finalidad medir las condiciones de presión y velocidad del flujo, tanto en la entrada como en la salida del sistema. Dichas mediciones son esenciales para determinar el comportamiento del fluido dentro del inyector, ya que permiten calcular el número de Reynolds, parámetro fundamental que clasifica el régimen del flujo en laminar o turbulento.

La metodología de pruebas se dividió en cuatro etapas principales: medición de presión estática, medición de presión dinámica, determinación de la velocidad de entrada y evaluación de la velocidad de salida. Cada una de estas etapas se realizó con el apoyo de instrumentos específicos y bajo condiciones controladas, a fin de garantizar la repetibilidad y confiabilidad de los resultados.

### 3.4.1. Medición de presión estática

La presión estática se define como aquella ejercida por el fluido cuando permanece en reposo o confinado dentro de un volumen. En este caso, corresponde a la presión interna generada en el compartimento de almacenamiento del humo, antes de que este sea conducido hacia los tubos de Venturi.

Para llevar a cabo esta medición, se utilizó un manómetro digital Autool PT520, seleccionado por su precisión y facilidad de lectura en pruebas de baja y media presión. Con el fin de registrar el valor, se diseñó una toma de presión ubicada en la parte posterior del prototipo, la cual se conectó al manómetro mediante una manguera flexible.

De este modo, se pudo obtener una lectura directa de la presión acumulada en el dispositivo, lo que resultó fundamental para contrastar con la presión dinámica y corroborar el comportamiento previsto por la ecuación de Bernoulli. En la Figura 3-18 se muestra el manómetro digital empleado en el experimento, y en la Figura 3-19 se observa la toma de presión incorporada al diseño del prototipo.



*Figura 3.4.1—18: Manómetro digital Autool PT520*

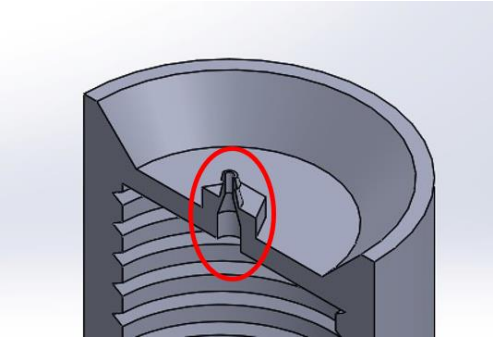


*Figura 3.4.1—19: Toma de presión estática*

### 3.4.2. Medición de presión dinámica

La presión dinámica está asociada al movimiento del fluido y se relaciona directamente con la energía cinética del flujo. Para medirla, se empleó nuevamente el manómetro digital Autool PT520, aunque en esta ocasión se colocó en la salida de los tubos de Venturi.

Esta medición permitió obtener el valor de la presión ejercida por el aire en movimiento justo al momento de ser expulsado. Al comparar la presión dinámica con la presión estática previamente registrada, se pudo verificar la distribución de energía dentro del sistema y comprobar los principios teóricos de la dinámica de fluidos aplicados en el diseño del inyector.

### 3.4.3. Velocidad de entrada de flujo

La velocidad de entrada del flujo constituye una condición inicial crítica, ya que define la cantidad de energía disponible para ser transformada dentro del dispositivo. Para generarla, se utilizó una turbina S91C021, encargada de suministrar aire al prototipo con un flujo constante.

La medición de esta velocidad se realizó directamente en la boquilla de salida de la turbina utilizando un anemómetro digital Peakmeter PM6252B, el cual permitió registrar con precisión la magnitud del flujo de aire suministrado. Dicho valor se consideró como referencia para todas las pruebas, asegurando que los ocho modelos trabajaran bajo las mismas condiciones de entrada.

En la Figura 3-20 se ilustra la turbina utilizada como generadora de flujo, mientras que en la Figura 3-21 se aprecia el anemómetro digital empleado para medir la velocidad inicial del aire.



*Figura 3.4.3—20: Turbina S91C021*



*Figura 3.4.3—11: Anemómetro digital Peakmeter pm6252b*

### 3.4.4. Velocidad de salida de flujo

La velocidad de salida del flujo fue medida con el propósito de analizar cómo las diferentes configuraciones geométricas de los prototipos influían en la aceleración y distribución del aire al atravesar los tubos de Venturi.

Para mantener consistencia en las condiciones de prueba, la turbina se conectó directamente a la entrada de cada modelo, garantizando que la velocidad inicial del aire fuera la misma en todos los casos. Posteriormente, con ayuda del anemómetro digital Peakmeter PM6252B, se registró la velocidad del flujo a la salida de cada uno de los canales del prototipo.

Las pruebas se realizaron en los modelos con tres salidas y en aquellos con cinco salidas, lo que permitió comparar cómo el número de canales afecta la velocidad de expulsión y, en consecuencia, el número de Reynolds calculado. Estos resultados fueron clave para determinar qué configuraciones eran más favorables para alcanzar un flujo laminar.

### 3.4.5. Resultados

En la tabla 3—10 se presentan los resultados correspondientes a dos tipos de registros de presión: presión estática y presión dinámica. La primera se refiere a la presión medida en la toma diseñada en la parte superior del prototipo, tal como se explicó en apartados anteriores, la cual representa la acumulación de aire en reposo dentro del dispositivo de almacenamiento. En contraste, las presiones registradas en las distintas tomas de salida corresponden a la presión dinámica, ya que son obtenidas directamente en los canales de expulsión del flujo y reflejan la energía asociada al movimiento del aire al atravesar los tubos de Venturi.

| Modelos | PRESION ESTATICA (KPA) | TOMA 1 | TOMA 2 | TOMA 3 | TOMA 4 | TOMA 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.6 | 1.5 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 |
| 2 | 1.6 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | X | X |
| 3 | 1.6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 4 | 1.6 | 1 | 1.2 | 1.5 | X | X |
| 5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | X | X |
| 6 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| 7 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | X | X |
| 8 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |

*Tabla 3—10: Prueba de resultados de presión estática y dinámica por toma de salida de humo*

En la tabla 3—11 podemos apreciar las velocidades máximas de cada uno de nuestros modelos, para ello tenemos la velocidad máxima la cual es la velocidad promedio que se obtuvo en las pruebas realizadas, y también tenemos las velocidades en cada salida de los tubos de Venturi.

| Modelos | VEL MAX | TOMA 1 | TOMA 2 | TOMA 3 | TOMA 4 | TOMA 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 4.93 | 4.97 | 4.92 | 4.92 | 4.92 | 4.92 |
| 2 | 4.44 | 4.44 | 4.44 | 4.44 | X | X |
| 3 | 2.74 | 2.74 | 2.74 | 2.74 | 2.74 | 2.74 |
| 4 | 2.4 | 2.55 | 2.4 | 2.25 | X | X |
| 5 | 5.44 | 5.44 | 5.44 | 5.44 | X | X |
| 6 | 5.08 | 5.08 | 5.08 | 5.08 | 5.08 | 5.08 |
| 7 | 2.77 | 2.77 | 2.77 | 2.77 | X | X |
| 8 | 3.73 | 3.73 | 3.73 | 3.73 | 3.73 | 3.73 |

*Tabla 3.4.5—11: Resultados de velocidades de salida por toma y velocidad máxima de cada modelo*

Ya una vez tenemos las velocidades, vamos a usar las velocidades máximas para usarlas en la ecuación de Reynolds y de esta forma poder determinar si el modelo posee la capacidad para generar un flujo laminar con sus tubos de Venturi.

### 3.4.6. Aplicación de ecuación de numero de Reynolds

Con las velocidades ya establecidas, ahora tenemos que tomar en cuenta cual será la sección lineal por la que pasará el flujo, está la tomaremos como la sección lineal de la garganta de nuestros tubos de Venturi. Esta sección es el producto de los diseños previamente hechos en SolidWorks y orientados por la matriz ortogonal Taguchi L8. En la tabla 3—12 podemos observar cuales son dichas secciones lineales de cada modelo.

| Modelos | Sección Lineal (mm) |
|---|---|
| 1 | 45 |
| 2 | 20 |
| 3 | 9.5 |
| 4 | 27.5 |
| 5 | 25 |
| 6 | 5.14 |

| | |
|---|---|
| 7 | 31.5 |
| 8 | 43.75 |

*Tabla 3.4.6—12: Dimensiones de sección lineal de la garganta de cada modelo*

Ya con esto, solo nos queda calcular el número de Reynolds tomando en cuenta los puntos mencionados anteriormente y la temperatura del fluido que estamos usando, que en este caso es aire a 25° Celsius. Las propiedades del aire a esa temperatura nos indica que tenemos una densidad de 1.184 kg/m$^3$, una viscosidad dinámica de 1.86*10$^{-5}$ kg/ (m*s) y una viscosidad cinemática de 1.571*10$^{-5}$ m$^2$/s.

En la tabla 3—13 nos muestra los resultados obtenidos y la clasificación de cada modelo, ya sea si genera flujo laminar si este número está por debajo de 2000, o turbulento si está por encima de los 4000.

| Modelos | VEL MAX | TEMP (°C) | Sección Lineal (mm) | NUMERO DE REYNOLDS | TIPO DE FLUJO |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 4.93 | 25 | 45 | 14,121 | TURBULENTO |
| 2 | 4.44 | 25 | 20 | 5,652 | TURBULENTO |
| 3 | 2.74 | 25 | 9.5 | 1,657 | LAMINAR |
| 4 | 2.4 | 25 | 27.5 | 4,201 | TURBULENTO |
| 5 | 5.44 | 25 | 25 | 8,656 | TURBULENTO |
| 6 | 5.08 | 25 | 5.14 | 1,662 | LAMINAR |
| 7 | 2.77 | 25 | 31.5 | 5,554 | TURBULENTO |
| 8 | 3.73 | 25 | 43.75 | 10,387 | TURBULENTO |

*Tabla 3.4.6—13: Resultados finales de cada modelo con su caracterización de flujo*

Como observamos en la tabla 3—13, los modelos 3 y 6 son los únicos dos modelos que nos generan un flujo laminar, por lo que aquí es donde podemos empezar a estudiar cuales son las cualidades que tienen ambos modelos los cuales hacen que nos genere un flujo laminar. En este caso, podemos notar que estos modelos son los que tienen una sección lineal más cortos que el resto de los modelos, por lo que podemos tomar de referencia para el diseño de nuestro modelo optimo.

### 3.5. Aplicación de resultados en Minitab

Una vez obtenidos los resultados experimentales correspondientes a cada uno de los ocho modelos definidos mediante la matriz ortogonal Taguchi L8, se procede a su análisis estadístico en el software Minitab. Este proceso tiene como finalidad evaluar de manera cuantitativa el impacto de cada variable de diseño sobre la respuesta del sistema, representada en este caso por el número de Reynolds. Para ello, se emplea la filosofía de diseño experimental de Taguchi bajo el criterio de calidad "menor es mejor", lo cual permite identificar las configuraciones que favorecen la obtención de flujos laminares.

En la tabla 3—14, en la columna C8 colocamos manualmente los resultados de los números de Reynolds de cada modelo, y esa columna la seleccionamos para analizar toda la matriz y seleccionamos la columna como análisis de respuesta:

| ↓ | C1 | C2 | C3-T | C4-T | C5 | C6-T | C7 | C8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | D. Ent. AH | Dif.Ext | Alc.Ent.Con | Enroscado | No.Salidas | Cañón | | No. Reynolds |
| 1 | 65 | 0.5 | H.Pared | Si | 5 | No | | 14121 |
| 2 | 65 | 0.5 | H.Pared | No | 3 | Si | | 5652 |
| 3 | 65 | 0.3 | 50% | Si | 5 | Si | | 1657 |
| 4 | 65 | 0.3 | 50% | No | 3 | No | | 4201 |
| 5 | 55 | 0.5 | 50% | Si | 3 | No | | 8656 |
| 6 | 55 | 0.5 | 50% | No | 5 | Si | | 1662 |
| 7 | 55 | 0.3 | H.Pared | Si | 3 | Si | | 5554 |
| 8 | 55 | 0.3 | H.Pared | No | 5 | No | | 10387 |

*Tabla 3.5—14: Análisis de la matriz en Minitab usando la columna C8 como análisis de respuesta*

#### 3.5.1. Simulación de medias

Una vez introducidos los resultados experimentales en el software Minitab y definida la columna de respuesta como el número de Reynolds obtenido en cada modelo, se llevó a cabo la simulación de medias con el propósito de identificar la influencia de cada variable de diseño sobre el comportamiento del flujo.

| Fuente | GL | SC Sec. | SC Ajust. | MC Ajust. | F | P |
|---|---|---|---|---|---|---|
| D. Ent. AH | 1 | 49298 | 49298 | 49298 | 0.60 | 0.582 |
| Dif.Ext | 1 | 8594658 | 8594658 | 8594658 | 103.77 | 0.062 |
| Alc.Ent.Con | 1 | 47716681 | 47716681 | 47716681 | 576.12 | 0.027 |
| Enroscado | 1 | 8172924 | 8172925 | 8172925 | 98.68 | 0.064 |
| No.Salidas | 1 | 1770962 | 1770962 | 1770962 | 21.38 | 0.136 |
| Cañón | 1 | 65208200 | 65208200 | 65208200 | 787.31 | 0.023 |
| Error residual | 1 | 82825 | 82825 | 82825 | | |
| Total | 7 | 131595547 | | | | |

*Tabla 3.5.1—15: Análisis de varianza de medias*

El análisis de la tabla 3—15 permitió establecer que no todas las variables ejercen un efecto significativo en la respuesta. De acuerdo con los valores obtenidos en la prueba de análisis de varianza (ANOVA), se observó que los factores “Alcance de la entrada cónica” y “Cañón” presentan una influencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$) en la generación de flujos laminares, al mostrar los valores de F más elevados y con mayor consistencia en la reducción del número de Reynolds.

Por otra parte, las variables “Diferencia de diámetro de extractor” y “Enroscado” mostraron efectos cercanos al nivel de significancia ($p \approx 0.06$), lo que indica que podrían influir de manera secundaria en el comportamiento del flujo, aunque su impacto no es concluyente bajo un criterio estricto de confianza del 95 %. Finalmente, las variables “Diámetro de entrada aire-humo” y “Número de salidas” no presentaron efectos significativos ($p > 0.10$), por lo que se consideran de menor relevancia en la caracterización del modelo.

Con base en la simulación de medias, se concluye que la combinación de un alcance de entrada cónica reducido junto con la implementación de cañón en la salida favorece la disminución del número de Reynolds y, por lo tanto, la obtención de un flujo laminar más estable dentro del túnel de viento. Este resultado constituye un primer paso para la selección del modelo óptimo, el cual será analizado en los apartados posteriores.

### 3.5.2. Análisis de resultados de cada variable

Con el propósito de identificar el efecto de cada variable de diseño sobre la respuesta del sistema, representada por el número de Reynolds, se elaboró la Tabla 3–16, en la cual se muestran las medias correspondientes a cada nivel de las variables, así como el valor delta y el orden de clasificación de influencia. Adicionalmente, en la Figura 3–17 se presenta la gráfica de efectos principales para relaciones señal-ruido (SN), siguiendo el criterio “menor es mejor”.

| Nivel | D. Ent. AH | Dif.Ext | Alc.Ent.Con | Enroscado | No.Salidas | Cañón |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 6565 | 5450 | 8929 | 7497 | 6016 | 9341 |
| 2 | 6408 | 7523 | 4044 | 5476 | 6957 | 3631 |
| Delta | 157 | 2073 | 4885 | 2022 | 941 | 5710 |
| Clasificar | 6 | 3 | 2 | 4 | 5 | 1 |

*Tabla 3.5.2—16:Tabla de respuestas para media*

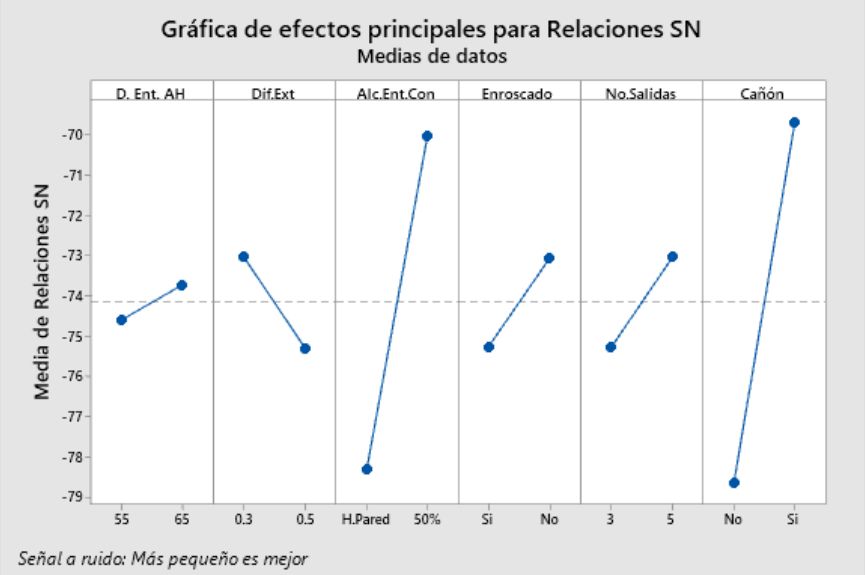



*Tabla 3.5.2—17: Grafica de efectos principales para relaciones SN*

Los resultados obtenidos evidencian que la variable con mayor impacto es el Cañón, con un delta de 5710, seguido por el Alcance de la entrada cónica con un delta de 4885. Estas dos

variables demostraron ser determinantes en la reducción del número de Reynolds, lo que se confirma en la gráfica, donde la pendiente de sus líneas es la más pronunciada, indicando un cambio significativo entre niveles.

En tercer lugar, se encuentra la Diferencia de diámetro del extractor, con un delta de 2073, y el Enroscado con un valor similar de 2022. Si bien su efecto es menor que el de las variables principales, ambos factores muestran una tendencia que sugiere un papel complementario en el control del flujo.

Por su parte, las variables Número de salidas (delta = 941) y Diámetro de entrada aire-humo (delta = 157) presentaron una influencia reducida en comparación con las anteriores, ocupando los últimos lugares en la clasificación. Esto indica que, aunque contribuyen a la configuración general del modelo, no representan un factor decisivo en la disminución del número de Reynolds.

De acuerdo con la gráfica de efectos principales, las configuraciones que favorecen el comportamiento laminar corresponden a:

- Entrada cónica al 50 %
- Con cañón
- Diferencia de diámetro de 0.3 mm
- Sin enroscado
- Tres salidas
- Diámetro de entrada de 55 mm.

El análisis estadístico confirma que el Cañón y el Alcance de la entrada cónica son las variables críticas para el diseño del inyector de humo, mientras que las demás variables poseen un impacto secundario o marginal. Esta información será utilizada en la selección y justificación del modelo óptimo en el apartado siguiente.

### 3.5.3. Interpretación de modelo optimo

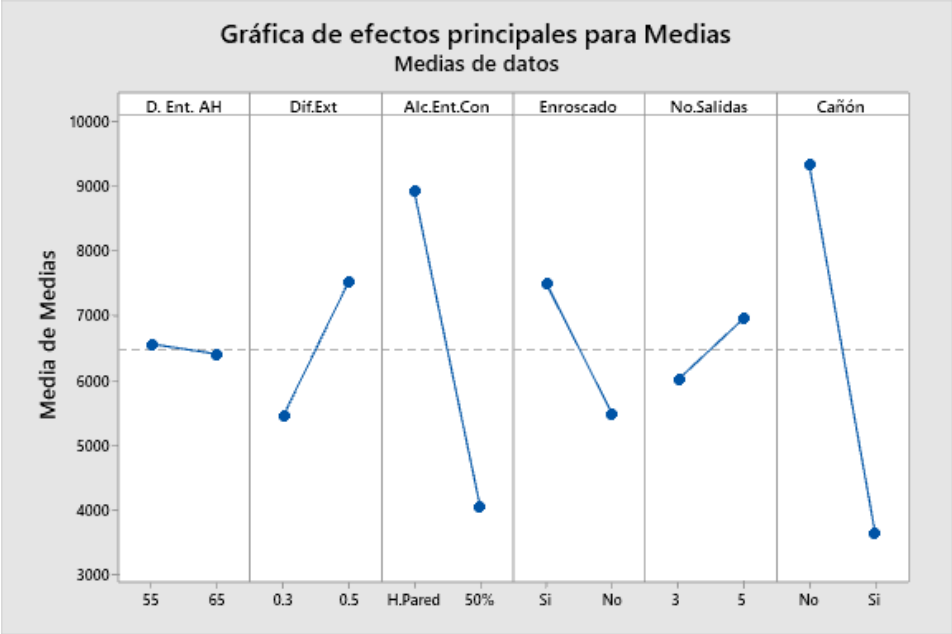



*Tabla 3.5.3—18: Grafica de efectos principales para medias*

La Figura 3–18 muestra la gráfica de efectos principales para medias, la cual permite observar la influencia de cada variable de diseño sobre el número de Reynolds. Dado que se aplicó el criterio de calidad ‘menor es mejor’, el análisis se centró en los puntos situados por debajo de la media en cada factor, los cuales corresponden a los niveles que favorecen la reducción de la respuesta. De esta manera, al combinar dichos niveles en un solo modelo, se obtiene la configuración óptima que asegura un comportamiento de flujo más cercano al régimen laminar.

## 3.6. Diseño del modelo optimo

| Modelo Optimo | |
|---|---|
| Diámetro de entrada aire-humo | 65 mm |
| Diferencia de diámetro de extractor | 0.3 |
| Alcance de la entrada cónica | 50% |
| Enroscado | No |

| | |
|---|---|
| **Numero de salidas** | **3** |
| **Cañón** | **Si** |

*Tabla 3.6—19: Configuración para el modelo optimo*

En base a los resultados de la figura *3—18* nos basamos para poder determinar cada tipo de variable que usaremos para nuestro modelo optimo.

# 4. RESULTADOS

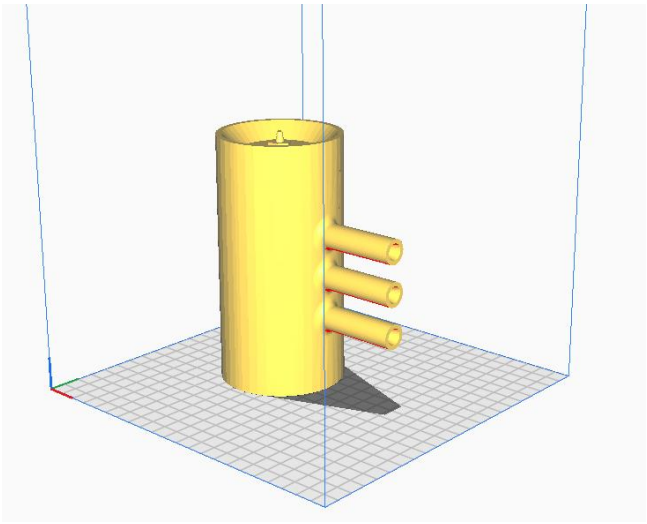


*Figura 4—1: Modelo Optimo en UltiMaker Cura*

En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos a partir de los prototipos diseñados y fabricados en la fase previa del proyecto. El objetivo de esta sección es mostrar de manera ordenada las mediciones realizadas de presión estática, presión dinámica y velocidad de flujo, así como el cálculo del número de Reynolds para cada configuración evaluada.

Los datos obtenidos permiten analizar la influencia de las variables geométricas definidas mediante la matriz ortogonal Taguchi L8 sobre el comportamiento del flujo de aire en los tubos de Venturi. De igual forma, se contrastan los valores experimentales con las teorías de dinámica de fluidos empleadas como base del diseño, principalmente los principios de Bernoulli y Reynolds.

En la Figura 4–1 se muestra el modelo óptimo diseñado en SolidWorks y posteriormente exportado en formato STL para ser procesado en UltiMaker Cura. Esta figura ilustra la configuración geométrica seleccionada a partir de los análisis estadísticos realizados en el

capítulo anterior y constituye la referencia principal de este apartado, ya que sobre este diseño se efectuaron las pruebas experimentales de validación.

Finalmente, se expone la validación del modelo óptimo, el cual integra las configuraciones más favorables para la generación de un flujo laminar. Este análisis no solo confirma el cumplimiento de los objetivos planteados, sino que también establece las bases para las conclusiones y propuestas de investigación futura.

## 4.1. Obtención de pruebas de modelo optimo

| Modelos | PRESION (KPA) | TOMA 1 | TOMA 2 | TOMA 3 |
|---|---|---|---|---|
| YOPTIMO | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |

*Tabla 4.1—1: Resultados de presión estática y presión dinámica*

| Modelos | VEL MAX | TEMP (°c) | TOMA 1 | TOMA 2 | TOMA 3 |
|---|---|---|---|---|---|
| YOPTIMA | 2.78 | 25 | 2.56 | 2.56 | 2.56 |

*Tabla 4.1—2: Resultados de velocidad*

En esta etapa se realizaron las pruebas experimentales al modelo óptimo definido en el capítulo anterior, con el propósito de validar su desempeño frente a las configuraciones generadas en la matriz ortogonal Taguchi L8. El objetivo principal fue comprobar que dicho modelo cumpliera con los criterios establecidos para la generación de un flujo laminar dentro del túnel de viento.

La medición de presiones estática y dinámica mostró valores constantes en las tres salidas del prototipo, como se aprecia en la Tabla 4–1. Los registros obtenidos fueron de 1.5 kPa en todas las tomas, lo cual indica que el dispositivo mantiene una presión estable y uniforme en su cámara de almacenamiento. Este comportamiento es relevante, ya que una presión equilibrada en el interior asegura que el humo salga de manera homogénea por cada tubo de Venturi, favoreciendo la estabilidad del flujo y evitando perturbaciones locales.

De forma complementaria, se realizaron pruebas de velocidad de salida en cada uno de los tres conductos. Los resultados, presentados en la Tabla 4–2, arrojaron una velocidad

máxima promedio de 2.78 m/s, con valores prácticamente idénticos en cada toma de salida (2.56 m/s). La uniformidad observada entre las tres salidas constituye un indicio de que el modelo optimizado distribuye de manera eficiente la energía del flujo, garantizando que cada línea de humo se mantenga estable y sin desviaciones abruptas durante su recorrido en la cámara de pruebas.

En comparación con los modelos iniciales, el modelo óptimo no alcanzó las mayores velocidades de salida, pero sí logró un equilibrio notable entre presión, velocidad y estabilidad del flujo, lo cual es esencial para cumplir con el objetivo de generar un régimen laminar.

### 4.2. Aplicación de ecuación del número de Reynolds en modelo optimo

| Modelo | Velocidad (M/S) | Sección Lineal (mm) | Temperatura (°C) | Densidad del Aire (kg/m$^3$) | Viscosidad Dinámica (kg/(m*s)) | Viscosidad Cinemática (m$^2$/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Optimo | 2.78 | 6.25 | 25 | 1.184 | $1.86*10^{-5}$ | $1.571*10^{-5}$ |

*Tabla 4.2—3: Valores necesarios para nuestra ecuación de numero de Reynolds.*

Con las velocidades máximas obtenidas, se procedió a calcular el número de Reynolds correspondiente al modelo óptimo. Para ello, se consideraron las dimensiones geométricas del prototipo, en particular la sección lineal de la garganta, que en este caso resultó ser de 6.25 mm. Este valor corresponde a la menor sección lineal entre todos los modelos diseñados, lo que representa una ventaja en términos de control del flujo.

$$Re = \frac{\left(1.184\ \frac{Kg}{m^3}\right)\left(2.78\frac{m}{s}\right)(0.00625\ m)}{1.86 * 10^{-5}\frac{Kg}{m * s}}$$

*Ecuación 4.2—1: Aplicación de ecuación de numero de Reynolds del modelo optimo.*

Los datos físicos del aire empleados fueron: densidad de 1.184 kg/m$^3$, viscosidad dinámica de $1.86*10^{-5}$ kg/(m*s) y viscosidad cinemática de $1.571*10^{-5}$ m$^2$/s, todos correspondientes a una temperatura ambiente de 25 °C. Con estos valores y aplicando la ecuación del número de Reynolds (Ecuación 4–1), se obtuvo un resultado de 1,106.

Este valor se encuentra por debajo del umbral de 2,000, límite convencional que separa el régimen laminar del turbulento. Por lo tanto, el modelo óptimo puede clasificarse como un dispositivo capaz de generar un flujo laminar estable, condición indispensable para la correcta visualización de líneas de corriente en estudios aerodinámicos.

El resultado confirma que la configuración geométrica propuesta, en particular la combinación de entrada cónica al 50 % y salida con cañón, permitió reducir significativamente el número de Reynolds en comparación con otros prototipos.

### 4.3. Comparación de resultados previos

Para valorar el desempeño del modelo óptimo, se realizó una comparación directa con los modelos que previamente habían mostrado los valores más bajos de número de Reynolds, es decir, los modelos 3 y 6.

Como se indicó en la tabla 3–13, los modelos 3 y 6 alcanzaron números de Reynolds de 1,657 y 1,662 respectivamente. Estos resultados ya habían demostrado la capacidad de dichas configuraciones para inducir un flujo laminar. Sin embargo, el modelo optimizado logró un número de Reynolds de 1,106, es decir, una reducción cercana al 33 % respecto al mejor de los modelos experimentales.

Esta mejora no solo confirma la validez del análisis estadístico realizado con el software Minitab, sino que también respalda la hipótesis inicial de que es posible diseñar un inyector de humo que garantice un flujo laminar mediante la correcta selección de variables geométricas.

En términos prácticos, la comparación demuestra que el modelo óptimo ofrece ventajas adicionales:

- Mayor estabilidad: las velocidades de salida en las tres tomas fueron prácticamente idénticas, lo que asegura uniformidad en las líneas de humo.
- Mejor visualización: al generar un flujo más cercano al régimen laminar, se reducen las perturbaciones y turbulencias indeseadas en la cámara de pruebas.

- Eficiencia en diseño: se logró reducir el Reynolds sin necesidad de recurrir a presiones elevadas o modificaciones costosas, utilizando únicamente ajustes en la geometría.

Con base en esta comparación, se puede concluir que el modelo óptimo no solo superó a los mejores prototipos de la matriz Taguchi, sino que también estableció un nuevo punto de referencia para futuras aplicaciones de inyectores de humo en túneles de viento.

### 4.4. Visualización e interpretación de resultados físicos

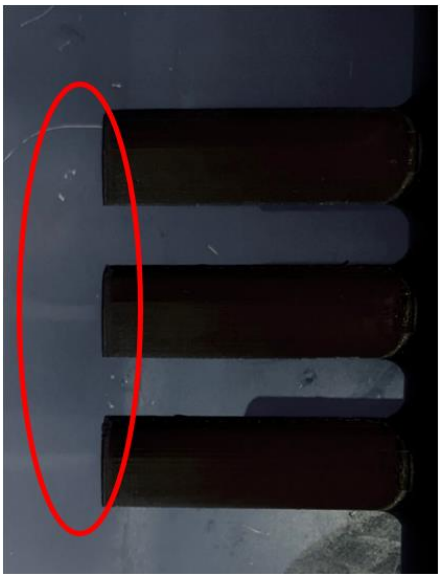


*Figura 4.4—2: Vista superior de extracción de humo*

Como podemos apreciar en al figura 4-2, el humo extraído posee un comportamiento laminar. Sin embargo, dado a que la comprobación de dicha hipótesis es por medio del método de “Almacenar e inyectar”, en donde primero inyectamos el humo directamente a la pieza para poder almacenar dentro del modelo una cierta cantidad de humo, para posteriormente inyectar aire lo cual hace que empuje dicho humo hacia los extractores. Es un método practico el cual nos permite ahorrar insumos para generar el humo y energía eléctrica la cual es proporcionada a la maquina de humo y la turbina que genera el aire de empuje.

Dado a que estamos usando este método, el aire que genera la turbina tiene que ser a baja velocidad para así prolongar un poco mas la cantidad de humo que esta depositado en la pieza y así poder visualizar dichas líneas de humo en estas pruebas en particular. Dichas líneas también las podemos observar en la figura 4-3.

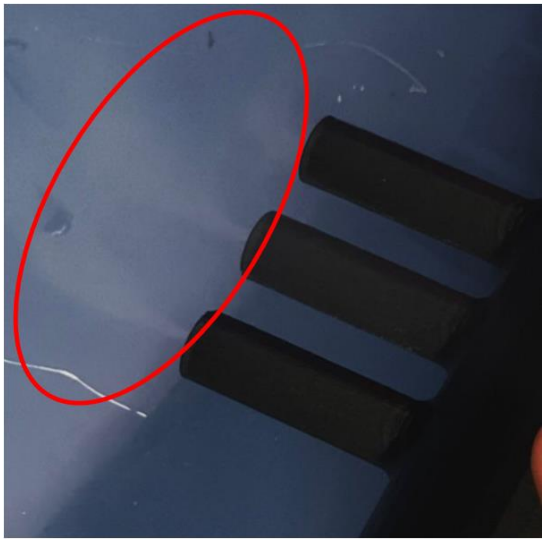


*Figura 4.4—3: Vista isométrica de extracción de humo*

## 5. CONCLUSIONES

El presente trabajo tuvo como finalidad el diseño, fabricación y validación de un inyector de humo optimizado para el túnel de viento del Instituto Tecnológico Nacional de México, campus Culiacán. A través de un proceso metodológico basado en los principios de dinámica de fluidos, en particular las ecuaciones de Bernoulli y Reynolds, así como en la aplicación de la metodología Taguchi L8, fue posible establecer un modelo capaz de generar un flujo laminar estable, condición indispensable para la visualización clara y confiable del comportamiento aerodinámico.

En primer lugar, se definieron seis variables críticas de diseño: diámetro de entrada aire-humo, diferencia de diámetro de extractor, alcance de la entrada cónica, enroscado interno, número de salidas y presencia de cañón en la salida. Cada una de estas variables fue analizada en dos niveles, generando ocho configuraciones experimentales conforme a la matriz ortogonal Taguchi L8. Esta metodología permitió reducir significativamente el número de prototipos a fabricar y ensayar, optimizando recursos materiales y de tiempo en comparación con métodos tradicionales de diseño por prueba y error.

Tras la modelación en SolidWorks y la manufactura de los prototipos mediante impresión 3D, se realizaron pruebas experimentales de presión estática, presión dinámica, velocidad de flujo y cálculo del número de Reynolds. Los resultados obtenidos mostraron que únicamente los modelos 3 y 6 lograron generar flujos con un número de Reynolds menor a 2000, correspondientes a un régimen laminar. En contraste, el resto de los modelos presentó valores superiores a 4000, lo que los clasificó como turbulentos. Este hallazgo confirmó que la geometría de la garganta del Venturi y la longitud de estrangulación constituyen factores determinantes en la transición de flujo.

El análisis estadístico realizado en Minitab corroboró estas observaciones. A través de las gráficas de efectos principales y el análisis de varianza (ANOVA), se identificó que las variables con mayor impacto en la reducción del número de Reynolds fueron el alcance de la entrada cónica y la presencia del cañón en la salida, seguidas de la diferencia de diámetro del extractor y el enroscado interno. Por otro lado, el diámetro de entrada y el número de salidas mostraron

una influencia marginal. Estos resultados concuerdan con las bases teóricas de la dinámica de fluidos: de acuerdo con la ecuación de Bernoulli, la aceleración en zonas de estrangulamiento depende fuertemente de la geometría de entrada y salida, lo que explica la sensibilidad del flujo a dichas variables.

Con base en el análisis experimental y estadístico, se propuso un modelo óptimo con las siguientes características: diámetro de entrada de 65 mm, diferencia de diámetro de 0.3 mm, entrada cónica prolongada al 50 %, sin enroscado, tres salidas y con cañón en la salida. La validación de este diseño arrojó un número de Reynolds de 1,106, confirmando un régimen laminar y mejorando de manera significativa los resultados obtenidos con los modelos 3 y 6, que alcanzaron valores de 1,657 y 1,662 respectivamente. Este hallazgo representa una mejora sustancial, ya que no solo cumple con el objetivo general planteado, sino que además demuestra la eficacia de la metodología empleada.

El cumplimiento de los objetivos específicos puede resumirse de la siguiente manera:

- Se aplicaron los principios de Bernoulli y Reynolds para fundamentar el diseño de los inyectores.
- Se definieron y evaluaron las variables de diseño mediante la matriz Taguchi L8.
- Se modelaron y manufacturaron los ocho prototipos en CAD e impresión 3D.
- Se llevaron a cabo pruebas experimentales de presión y velocidad en cada modelo.
- Se calculó el número de Reynolds en cada configuración, identificando las condiciones que favorecen el flujo laminar.
- Se aplicó el software Minitab para analizar estadísticamente las variables más influyentes.
- Finalmente, se validó un modelo óptimo que cumple con el criterio de flujo laminar en túneles de viento.

En términos de impacto académico y práctico, el desarrollo de este inyector de humo optimizado aporta una herramienta confiable para mejorar la visualización de líneas de corriente en el túnel de viento del instituto. Esto no solo fortalece las prácticas experimentales

de los estudiantes, sino que también abre la posibilidad de realizar investigaciones aerodinámicas de mayor calidad, con un nivel de detalle y precisión que antes resultaba limitado por el sistema de inyección de humo existente.

No obstante, este trabajo también presenta limitaciones. La validación experimental se restringió a pruebas con aire a temperatura ambiente, sin considerar variaciones en densidad o viscosidad que podrían presentarse en otras condiciones de operación. Asimismo, la manufactura por impresión 3D, aunque práctica y accesible, presenta limitaciones en cuanto a rugosidad superficial y resistencia de materiales, lo que podría influir en la estabilidad del flujo en aplicaciones a mayor escala.

En este sentido, se plantean las siguientes recomendaciones y líneas de investigación futura:

- Explorar el uso de otros materiales y procesos de manufactura, como mecanizado CNC o moldes de inyección, que permitan mejorar la precisión y durabilidad de los prototipos.
- Ampliar el estudio a diferentes condiciones de operación, considerando variaciones de temperatura, humedad o incluso la inyección de otros fluidos trazadores además del humo.
- Investigar configuraciones geométricas adicionales que no fueron contempladas en este diseño, como variaciones en el ángulo de entrada o en la relación longitud/diámetro de la garganta.
- Integrar el modelo optimizado dentro de un protocolo de ensayos estandarizado en el túnel de viento, con el fin de generar una base de datos comparativa que sirva para futuras investigaciones académicas.

En conclusión, el trabajo realizado demuestra que es posible optimizar el diseño de inyectores de humo mediante una metodología sistemática de diseño experimental, reduciendo costos y tiempos de desarrollo, y logrando un flujo laminar confiable en túneles de viento. Los resultados obtenidos no solo cumplen con los objetivos propuestos, sino que

también aportan nuevas perspectivas para investigaciones futuras en el campo de la aerodinámica experimental.

## 6. FUENTES DE INFORMACIÓN

Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications (4th ed.)*. McGraw-Hill.

Dahmani, H. K. (2018). Experimental study of a low-speed wind tunnel with smoke wire flow visualization. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments, 41*(3), 115-121.

Domínguez, M. O.-A. (2022). Principio de Bernoulli. *Ingenio y Conciencia*. *Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún, 9*(18), 58–65. Obtenido de https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/sahagun/article/view/8806/9095?utm_source=chatgpt.com

Fox, R. W. (2018). *Introduction to fluid mechanics*. Wiley.

Frederiksen, C. (9 de Febrero de 2023). *La lista de las instalaciones para pruebas de túnel de viento*. Obtenido de Dewesoft: https://dewesoft.com/es/blog/lista-de-instalaciones-para-pruebas-de-tunel-de-viento

Fuji Electric. (01 de Junio de 2024). *Descubrir el teorema de Bernoulli: principio, fórmula y ecuación*. Obtenido de Fuji Electric: https://www.fujielectric.fr/es/blog/teorema-de-bernoulli-principio-formula-ecuacion/?utm_source=chatgpt.com

Gutiérrez-Pulido, H. &.-S. (2016). *Análisis y diseño de experimentos* (Tercera ed.). McGraw-Hill Education.

Hassan, F. &.-H. (2017). Design and fabrication of a subsonic wind tunnel for educational and research purposes. *International Journal of Engineering and Technology, 9*(5), 374-380.

Hassan, M. A. (2015). On the use of smoke visualization for the analysis of flow around bluff bodies. *Alexandria Engineering Journal, 54*(4), 1121-1129. doi:10.1016/j.aej.2015.06.012

Karimi, N. &. (2020). Optimization of airfoil shape using Taguchi method and CFD analysis. *Journal of Aerospace Engineering, 33*(3).

Marca. (21 de Febrero de 2024). *Parafina o Flow Viz en la F1: qué es, cuándo se usa y por qué brillan los coches de Fórmula 1*. Obtenido de Marca: https://www.marca.com/motor/formula1/2024/02/21/65d5d6ef46163fa6258b459f.html

Mitchell, J. W. (2019). *Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics (10.ª ed.)*. Wiley.

Mott, R. L. (2015). *Mecanica de fluidos* (Septima ed.). Pearson.

Osma, M. F. (7 de Octubre de 2019). *Flujo laminar y turbulento*. Obtenido de Aerodinamica F1: https://www.aerodinamicaf1.com/2019/10/flujo-laminar-y-turbulento/

Ponzoni, L., Montenegro, S. O., Ganiele, M. J., Attorresi, L., & & Caccia, M. (2024). Visualización de flujo en túnel de viento subsónico abierto. *INNOVA UNTREF. Revista Argentina de Ciencia y Tecnología*(14). Obtenido de https://revistas.untref.edu.ar/index.php/innova/article/view/1941

Reyes, H. &. (2015). Flow field obtained by PIV technique for a scaled building in a wind tunnel. *Energy and Buildings*, 123–134. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.048

Trinder, H. &. (2020). Development of a smoke visualisation system for wind tunnel laboratory experiments. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 321–340.

## 7. REGISTROS DE PRODUCTOS

1. SolidWorks 2019 (Educational License). Software CAD utilizado para el diseño y modelado 3D de las piezas. La licencia empleada corresponde a la edición educativa, restringida a fines de enseñanza e investigación.
2. Minitab (versión de prueba gratuita, 30 días). Programa estadístico empleado para análisis de datos experimentales y elaboración de gráficos.
3. UltiMaker Cura. Software de preparación y laminado para impresión 3D, usado en la generación de trayectorias de impresión y parámetros de manufactura aditiva.