



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE INGENIERÍA DE AUTOMOTRIZ**

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DIDÁCTICO TIPO TÚNEL
DE VIENTO DE BAJO COSTO PARA ENSAYOS AERODINÁMICOS DE
VEHÍCULOS A ESCALA 1:20 PARA LA CARRERA DE INGENIERÍA
AUTOMOTRIZ DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA - SEDE
GUAYAQUIL**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Automotriz

AUTORES: JHON GLEN YÉPEZ ANDAGANA
JAVIER JHOSEET YÉPEZ ANDAGANA

TUTOR: ING. CARLOS WLADIMIR ROCHE INTRIAGO, MSc.

Guayaquil – Ecuador

2023

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Nosotros, Jhon Glen Yépez Andagana con documento de identificación N° 2000113882 y Javier Jhoseet Yépez Andagana con documento de identificación N° 2000113874; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 17 de Marzo del año 2023

Atentamente,



Jhon Glen Yépez Andagana
2000113882



Javier Jhoseet Yépez Andagana
2000113874

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Jhon Glen Yépez Andagana con documento de identificación N° 2000113882 y Javier Jhoseet Yépez Andagana con documento de identificación N° 2000113874, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Desarrollo e implementación de un banco didáctico tipo túnel de viento de bajo costo para ensayos aerodinámicos de vehículos a escala 1:20 para la carrera de Ingeniería Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana - Sede Guayaquil”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 17 de Marzo del año 2023

Atentamente,

Jhon Glen Yépez Andagana

2000113882

Javier Jhoseet Yépez Andagana

2000113874

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carlos Wladimir Roche Intriago con documento de identificación N°0104025838, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DIDÁCTICO TIPO TÚNEL DE VIENTO DE BAJO COSTO PARA ENSAYOS AERODINÁMICOS DE VEHÍCULOS A ESCALA 1:20 PARA LA CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA - SEDE GUAYAQUIL”, realizado por Jhon Glen Yépez Andagana con documento de identificación N° 2000113882 y Javier Jhoseet Yépez Andagana con documento de identificación N° 2000113874, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 17 de Marzo del año 2023

Atentamente,



Ing. Carlos Wladimir Roche Intriago, MSc.
0104025838

DEDICATORIA

A Dios, y a nuestra familia por darnos fortalezas para poder cumplir nuestros objetivos propuestos.

AGRADECIMIENTO

A todas las personas que confiaron en nosotros, y aquellos que nos dieron motivos para superarnos.

Al personal docente por sus enseñanzas y a los compañeros de clase por su apoyo.

RESUMEN

Unos de los problemas más comunes en la educación superior en nuestro país, es la falta de bancos didácticos que permitan fortalecer conocimientos impartidos en las aulas; es por ello que el presente proyecto técnico busca aportar a la cátedra de dinámica del automóvil, con el desarrollo e implementación de un banco didáctico tipo túnel de viento de bajo costo para la realización de ensayos aerodinámicos en modelos de vehículos a escala 1:20 por medio de la aplicación de metodologías experimentales, con lo que permita garantizar y afianzar el estudio de los comportamientos que inducen los fluidos y las fuerzas de resistencia sobre la estructura geométrica de vehículos propuestos a escala.

Para el alcance de objetivos se sustentará en las publicaciones e informes realizados por las normativas, SAE International e Internacional Organization for Standardization (ISO), las mismas que permiten dar soporte en el diseño y mecanismos en la toma de datos correlacionados con el túnel.

De manera didáctica, se instruye el uso de la placa electrónica, Arduino UNO, para la captación de datos por medio de dispositivos de sensado que ayuden a determinar variaciones en la carrocería del modelo vehicular con proporción 1:20, instalado en la cámara de ensayo de la corredera. A su vez, por medio de la creación de un aplicativo de visualización, se permite orientar los datos captados, los mismos que podrán ser instalados en los diferentes puntos de la carrocería del automóvil.

Se aplica la metodología de análisis estadístico, para efectuar la comparativa y verificación del comportamiento de los factores que inciden en el flujo que recorre el circuito, considerando los datos obtenidos mediante un proceso de parametrización CAE y el registro de la información por medio de instrumentación de sensado.

Palabras claves: Túnel de viento, Normativas, Aerodinámica, Microcontrolador, Parametrización

ABSTRACT

One of the most common problems in higher education in our country is the lack of didactic banks that allow strengthening the knowledge taught in the classroom; That is why this technical project seeks to contribute to the chair of automobile dynamics, with the development and implementation of a low-cost wind tunnel-type didactic bench for carrying out aerodynamic tests on vehicle models at a scale of 1:20 per through the application of experimental methodologies, which allows guaranteeing and strengthening the study of the behaviors that induce fluids and resistance forces on the geometric structure of vehicles proposed to scale.

For the scope of objectives, it will be based on the publications and reports made by the regulations, SAE International and the International Organization for Standardization (ISO), the same ones that allow to give support in the design and mechanisms in the collection of data correlated with the tunnel. In a didactic way, the use of the electronic board, Arduino UNO, is instructed to capture data through sensing devices that help determine variations in the body of the vehicle model with a 1:20 ratio, installed in the test chamber. In turn, through the creation of a visualization application, it is possible to orient the captured data, which can be installed in the different points of the car body.

The statistical analysis methodology is applied to compare and verify the behavior of the factors that affect the flow that runs through the circuit, considering the data obtained through a CAE parameterization process and the recording of information through instrumentation of sensed.

Key words: Wind tunnel, Normalization, Aerodynamic, Microcontroller, Parameterization

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT.....	viii
ÍNDICE DE CONTENIDO	ix
SIMBOLOGÍA	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvii
ÍNDICE DE TABLAS	xxi
ÍNDICE DE ECUACIONES	xxvii
CAPÍTULO I. Planteamiento de la investigación.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 PROBLEMA.....	2
1.2.1 Descripción del problema	2
1.2.2 Antecedentes	3
1.2.3 Importancia y alcances	4
1.2.4 Delimitación.....	5
1.3 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS	6
1.3.1 Objetivo general.....	6
1.3.2 Objetivos Específicos.....	7
CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	8
2.1 Dinámica del vehículo	8
2.2 Aerodinámica.....	8
2.2.1 Indicios de la aerodinámica en la Fórmula 1	9
2.3 Túnel de viento	10

2.3.1 Tipos de túneles de viento para investigación experimental	10
2.3.2 Descripción de diferentes tipos de túneles de viento	11
2.3.3 Variantes de túneles aerodinámicos.....	12
2.3.4 Partes de un túnel de viento	13
2.4 Comprensibilidad de los gases.....	16
2.5 Diagrama de Moody	16
CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN MATEMÁTICA.....	18
3.1 Criterios de dimensionamiento y diseño.....	18
3.1.1 Relación de bloqueo.....	18
3.1.2 Relación de las dimensionalidades entre ancho y alto de la cámara de ensayo.....	18
3.1.3 Perímetro húmedo.....	18
3.1.4 Diámetro hidráulico	19
3.1.5 Relación de longitud de la cámara de ensayo	19
3.1.6 Relación de contracción.....	20
3.1.7 Longitud de la contracción.....	20
3.1.8 Perfil lateral de la contracción mediante el uso de una ecuación con principio polinómico	21
3.1.9 Radios hidráulicos de las secciones del difusor.....	22
3.1.10 Ángulo de expansión cónica	22
3.1.11 Celdas de un estabilizador de flujo o panel	23
3.1.12 Diámetro hidráulico de una celda del estabilizador de flujo.....	23
3.1.13 Relación entre la longitud del panel y el diámetro hidráulico de su celda	23
3.1.14 Relación de porosidad del panel	24
3.2 Principios de la mecánica de fluidos.....	24
3.2.1 Presión atmosférica o barométrica.....	24

3.2.2 Densidad del fluido	25
3.2.3 Velocidad del sonido.....	26
3.2.4 Número de Mach.....	26
3.2.5 Ecuación de Continuidad	27
3.2.6 Ecuación de Bernoulli.....	28
3.2.7 Coeficiente de presión.....	29
3.2.8 Número de Reynolds.....	30
3.2.9 Factor de fricción	31
3.2.10 Pérdidas en un sistema	33
3.2.11 Flujo másico.....	34
3.2.12 Caudal volumétrico.....	34
3.2.13 Potencia requerida.....	34
CAPÍTULO IV. NORMATIVAS DE APLICACIÓN	35
4.1 Normativas para el diseño.....	35
4.1.1 SAE J1594	35
4.1.2 SAE J2071	40
4.1.3 SAE J2084	46
4.2 Normativa para la toma de datos	53
4.2.1 SAE J2881	53
4.2.2 ISO 17713-1.....	54
4.3 Metodología analítica respecto al dimensionamiento de las secciones del prototipo.....	57
4.3.1 Área frontal del objeto	57
4.3.2 Cámara de ensayos.....	58
4.3.3 Cámara de la Contracción.....	63
4.3.4 Cámara del Difusor	70

Longitud del difusor.....	72
4.3.5 Cámara de Estabilización.....	74
4.3.6 Dispositivo de enderezamiento de flujo: Panal o Honeycomb	75
4.3.7 Comparativa de criterios	82
4.4 Aplicación de la metodología de cálculo numérico mediante un software de carácter matemático basado en matrices	83
4.4.1 Perfil lateral de la contracción seccionado horizontalmente.....	83
4.4.2 Longitud del difusor en función al ángulo de expansión cónico de semi – apertura.....	85
4.5 Aplicación de la metodología de diseño y manufacturación 3D	86
4.5.1 Diseño de elementos	86
4.5.2 Construcción de la maqueta	88
4.6 Aplicación de la metodología de programación	98
4.2 Microsoft Visual Studio.....	102
Capítulo V. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DE AIRE EN EL CIRCUITO.....	104
5.1 Aplicación del método analítico en torno a la mecánica de fluidos	104
5.1.2 Antecedentes	104
5.1.3 Presión atmosférica	104
5.1.4 Densidad del aire.....	106
5.1.5 Velocidad sónica.....	107
5.1.6 Número de mach en relación a la velocidad más alta en el sistema aerodinámico	109
5.1.7 Velocidades en las secciones: Ecuación de Continuidad.....	109
5.1.8 Presiones en las secciones: Ecuación de Bernoulli.....	117
5.1.9 Número de Reynolds en las secciones	127
5.1.10 Factor de fricción para el régimen del flujo.....	132

5.1.11 Estudio de las pérdidas en el sistema	139
5.1.12 Razón de flujo de masa en la cámara de pruebas.....	151
5.1.13 Flujo volumétrico en la cámara de pruebas	152
5.1.14 Potencia requerida en el circuito aerodinámico	152
CAPÍTULO VI. ANÁLISIS Y RESULTADOS	154
6.1 Relación de magnitudes: presión y velocidad.....	154
6.1.1 Contracción	154
6.1.2 Difusor	155
6.2 Número de Reynolds en las componentes del circuito	157
6.3 Aplicación del método de análisis paramétrico	158
6.3.1. Etapa de preprocesamiento del módulo CFD	158
6.3.2 Etapa de procesamiento en Ansys Fluid Flow (Fluent).....	161
6.3.3 Simulaciones del prototipo aerodinámico.....	163
6.4 Diseño de experimentos mediante el software de análisis estadístico Minitab	166
6.4.1 Diseño factorial.....	166
6.4.2 Análisis de serie de tiempo en relación a los factores de estudio	168
6.5 Comparativa de las metodologías aplicadas	170
CAPÍTULO VII.	176
CONCLUSIONES	176
RECOMENDACIONES.....	178
REFERENCIAS.....	180
ANEXOS	186

SIMBOLOGÍA

Símbolo	Denominación		Unidad manejable
	EN	ES	
A	Cross-sectional area	Área de la sección transversal	m ²
a	One side of the duct area	Uno de los lados del ducto	m
A _f	Frontal area	Área frontal	m ²
A _R	Area ratio	Relación de áreas o relación de aspecto	—
A ₁	Inlet area	Área de entrada	m ²
A ₂	Exit area	Área de salida	m ²
β _h	Honeycomb porosity	Porosidad del panel	—
c _p	Pressure coefficient	Coefficiente de presión	—
D _h	Hydraulic diameter	Diámetro hidráulico	m
D _{h1}	Entrance hydraulic diameter	Diámetro hidráulico de entrada	m
D _{h2}	Exit hydraulic diameter	Diámetro hidráulico de salida	m
D _{hhc}	Hydraulic diameter of a honeycomb cell	Diámetro hidráulico de una celda del panel	m
ε	Roughness	Rugosidad o rugosidad absoluta	m
ε _r	Relative roughness	Rugosidad relativa o aspereza relativa	m
f	Friction factor	Factor de fricción de Darcy-Weisbach	—
f _{av}	Average friction coefficient	Coefficiente de fricción promedio	—
g	Gravitational Force	Fuerza de la gravedad o interacción gravitatoria	$\frac{m}{s^2}$
H _e	Contraction height at exit	Altura de la contracción a la salida	m
H _i	Contraction height at inlet	Altura de la contracción a la entrada	m
h _{Lmayor}	Major head loss	Pérdida mayor de carga por fricción o pérdida primaria	m
h _{Lmenor}	Minor head loss	Pérdida menor de carga por fricción o pérdida secundaria	m

K	Loss coefficient	Coefficiente de pérdida o de resistencia	—
k	Adiabatic gas constant	Razón de calor específico o constante adiabática del gas (aire)	—
γ			
k_B	Boltzmann constant	Constante de Boltzmann	$\frac{J}{K}$
L	Lenght	Longitud del difusor	m
L_c	Contraction lenght	Longitud de la contracción	m
L_h	Honeycomb thickness in flow direction	Espesor del panel en la dirección del flujo o grosor del panel	m
l: dh	Length – Hydraulic Diameter Ratio	Relación longitud – diámetro hidráulico	—
m	Average mass of one molecule of air	Masa promedio de una molécula de aire	kg
\dot{m}	Mass flow	Flujo o caudal másico	$\frac{kg}{m^3}$
Ma	Mach number	Número de Mach	—
n	Number of screens	Número de pantallas	—
ρ	Density of air	Densidad del aire	$\frac{kg}{m^3}$
P	Atmospheric Pressure	Presión atmosférica	Pa
P_0	Mean atmospheric pressure at sea level	Presión atmosférica media en el nivel del mar	Pa
PM	Wetted perimeter	Perímetro Mojado	m
R	Universal constant gas	Constante de gas	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$
R_b	Blockage ratio	Relación de bloqueo	—
R_c	Contraction ratio	Radio de la contracción	—
Re	Reynolds number	Número de Reynolds	—
R_h	Hydraulic radius	Radio Hidráulico	m
R_1	Radius at the entrance	Radio en la entrada o radio delantero	m
R_2	Radius at the exit	Radio en la salida o radio posterior	m
μ	Dynamic viscosity of the fluid	Viscosidad dinámica del fluido o viscosidad absoluta	$\frac{kg}{m \cdot s}$
ν	Kinematic viscosity	Viscosidad cinemática	$\frac{m^2}{s}$
φ			$\frac{s}{m}$
v	Air velocity	Velocidad del flujo	$\frac{m}{s}$

v_s	Speed of sound	Velocidad del sonido o velocidad sónica	$\frac{m}{s}$
\dot{V}	Volume flow rate o Discharge	Caudal, gasto o flujo volumétrico	$\frac{m^3}{s}$
w: h	Width – Height Ratio	Relación ancho – alto	–
x	Cartesian coordinate for streamwise	Coordenada cartesiana en sentido de la línea de flujo	m
X'	Non-dimensional streamwise distance and spanwise directions	Distancia no dimensional en el sentido de la línea de flujo y en dirección al tramo	–
θ_e	Conical expansion angle	Ángulo de expansión cónico o ángulo de semi apertura del difusor	° (grado sexagesimal)
$2\theta_e$	Total diffuser angle	Ángulo total del difusor	° (grado sexagesimal)

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de un túnel aerodinámico de circuito abierto.....	11
Figura 2 Esquema de un túnel aerodinámico de circuito cerrado.....	12
Figura 3 Rastrillo generador de corriente de humo	13
Figura 4 Tipos de panales	15
Figura 5 Sistema de ejes cartesianos.....	35
Figura 6 Velocidad del flujo libre.....	36
Figura 7 Sistema de coordenadas y convenciones.....	39
Figura 8 Corrección de presión dinámica	44
Figura 9 Numeración e identificación de medidas para modelos de investigación.....	45
Figura 10 Tipos de sección de pruebas	48
Figura 11 Cuerpo de farol.....	49
Figura 12 Sistema de banda móvil.....	50
Figura 13 Control de la capa límite por medio del sistema de cuchara	50
Figura 14 Sistema de captación simple por medio de ranuras.....	51
Figura 15 Control de la capa límite por succión distribuida.....	52
Figura 16 Expulsión tangencial	52
Figura 17 Medición de la posición del automóvil	53
Figura 18 Componentes del anemómetro de tipo hélice.....	55
Figura 19 Curva de calibración.....	56
Figura 20 Área frontal del modelo.....	58
Figura 21 Perfil seccionado de la contracción en vista lateral.....	69
Figura 22 Longitud de desplazamiento respecto a la expansión del ángulo cónico del difusor	74
Figura 23 Trigonometría del polígono hexagonal regular	78

Figura 24 Extracto de la codificación para el cálculo de la función polinomial	84
Figura 25 Extracto de la codificación para el cálculo de longitud del difusor respecto al ángulo de semi – apertura	86
Figura 26 Interfaz del software Autodesk Inventor	87
Figura 27 Interfaz gráfica de Cura Ultimaker	89
Figura 28 Altura de capa.....	90
Figura 29 Representación de patrones de relleno	91
Figura 30 Porcentaje de relleno relativo	91
Figura 31 Soporte originado en sólido sin cortes	93
Figura 32 Partes generales de la impresora Tenlog TL-D5	97
Figura 33 Secuencia de impresión del sólido	97
Figura 34 Interfaz gráfica de IDE Arduino.....	99
Figura 35 Pines del Arduino UNO R3.....	100
Figura 36 Puntos de entrada y salida del sensor BMP280.....	101
Figura 37 Librería para el sensor BMP280.....	102
Figura 38 Partes numeradas de Microsoft Visual Studio	103
Figura 39 Flujo uniforme y constante en una tubería de área variable.....	104
Figura 40 Descripción del desplazamiento del flujo en la contracción	114
Figura 41 Comportamiento de la velocidad vs área en la cámara de divergencia.....	117
Figura 42 Comportamiento de la presión en el interior de la contracción.....	122
Figura 43 Coeficiente de presión en la contracción en sentido unidimensional.....	124
Figura 44 Relación de la Presión vs Área en cono divergente	126
Figura 45 Pérdidas del circuito	151
Figura 46 Grafica en función de la presión – velocidad vs longitud	155
Figura 47 Gráfica fusionada respecto a la presión y velocidad vs el área del difusor.....	157

Figura 48 Herramienta para búsqueda de los límites (Boundary)	160
Figura 49 Distribución de presiones	163
Figura 50 Distribución de la temperatura	163
Figura 51 Línea de corriente de la velocidad.....	164
Figura 52 Velocidad del circuito con la instalación de un panel	165
Figura 53 Presión con la instalación del panel	165
Figura 54 Temperatura total con la instalación del panel	166
Figura 55 Flujograma para la creación de un diseño factorial completo	167
Figura 56 Resultados del diseño factorial.....	167
Figura 57 Tabla del diseño factorial	168
Figura 58 Serie de tiempo de la variable Velocidad.....	168
Figura 59 Histograma del índice de velocidad	169
Figura 60 Serie de tiempo respecto a la variable Temperatura.....	169
Figura 61 Serie de tiempo en función a la variable Presión	170
Figura 62 Histograma de la presión	170
Figura 63 Relación de intervalos de velocidad.....	171
Figura 64 Relación entre intervalos de la temperatura	173
Figura 65 Relación de los intervalos de presión	174
Figura 66 Suministro de carga para el ensayo aerodinámico	186
Figura 67 Registro de información del vehículo de estudio	187
Figura 68 Registro de información del túnel de viento	188
Figura 69 Curva característica de la contracción vista en perspectiva lateral izquierda	189
Figura 70 Intersección de radios en la tobera de entrada.....	189
Figura 71 Descripción de la curva de perfiles de la contracción de acuerdo al grado de la función polinómica	190

Figura 72 Longitud del cono de divergencia vs el ángulo cónico de expansión	191
Figura 73 Tabla de resultados de la codificación de la longitud vs ángulo del difusor	192
Figura 74 Panal hexagonal.....	197
Figura 75 Contracción	197
Figura 76 Cámara de ensayos	198
Figura 77 Difusor.....	198
Figura 78 Circuito del sensor BMP280 realizado en Proteus	200
Figura 79 Aplicativo desarrollada en Microsoft Visual Studio	202
Figura 80 Manufacturación de la contracción	203
Figura 81 Manufacturación de la cámara de pruebas	203
Figura 82 Prototipo aerodinámico	204
Figura 83 Placa para la captación de datos	204
Figura 84 Conexión del prototipo en el túnel de viento	205
Figura 85 Propiedades estándar del aire	206
Figura 86 Propiedades del aire a 101325 Pascales	207
Figura 87 Mapa de iteraciones de la simulación paramétrica.....	210
Figura 88 Energía cinética turbulenta.....	210
Figura 89 Resultado de la iteración en Ansys Fluent	211
Figura 90 Selección de parámetro de impresión según ilustración estadística.....	213

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de softwares de mayor aplicación	1
Tabla 2 Marcas de software de mayor preferencia en el mercado de las ingenierías	1
Tabla 3 Componentes generales del túnel de viento.....	14
Tabla 4 Clasificación completa de un flujo respecto a su número de Mach.....	27
Tabla 5 Intervalos para una caracterización específica del número de Reynolds.....	31
Tabla 6 Factor de fricción de Darcy según el flujo.....	31
Tabla 7 Ángulos del automóvil.....	35
Tabla 8 Parámetros del vehículo.....	36
Tabla 9 Parámetros de flujo	37
Tabla 10 Momentos y fuerzas	38
Tabla 11 Coeficientes de fuerzas y momentos.....	39
Tabla 12 Calidad de flujo para secciones de prueba de garganta abierta	40
Tabla 13 Descripción de las propiedades que evalúan la calidad de flujo.....	41
Tabla 14 Geometría de túneles de viento para estudio a tamaño real.....	42
Tabla 15 Geometría de túneles de viento a escala por reducción	43
Tabla 16 Parámetros que influyen en el túnel de viento	44
Tabla 17 Mediciones referenciales de modelos	46
Tabla 18 Dimensiones y potencia de los túneles de gran escala 1:1.....	47
Tabla 19 Términos del sistema móvil.....	49
Tabla 20 Requisitos de prueba.....	54
Tabla 21 Umbral inicial U_0	57
Tabla 22 Información para el cálculo del área de la cámara de prueba	59
Tabla 23 Información para el cálculo del ancho de la cámara de prueba	60
Tabla 24 Información para el cálculo de la altura de la cámara de prueba.....	61

Tabla 25 Información para el cálculo del diámetro hidráulico	62
Tabla 26 Información para el cálculo de la longitud de la cámara de prueba.....	62
Tabla 27 Información para el cálculo del área de entrada de la contracción	64
Tabla 28 Información para el cálculo del ancho a la entrada de la contracción	64
Tabla 29 Información para el cálculo de la altura de la contracción	65
Tabla 30 Coordenadas cartesianas del eje x.....	67
Tabla 31 Información para el cálculo de la altura por tramo del área en la contracción	68
Tabla 32 Altura por estructuración de puntos en la contracción.....	68
Tabla 33 Información para hallar los puntos de intersección	69
Tabla 34 Información para el cálculo de la longitud del cono de divergencia	73
Tabla 35 Dimensión longitudinal de la cámara en función del ángulo.....	73
Tabla 36 Información para el cálculo del número de celdas en el honeycomb	76
Tabla 37 Información para el cálculo del área de una celda del honeycomb	76
Tabla 38 Información para el cálculo de uno de los lados del honeycomb	79
Tabla 39 Información para el cálculo de la altura de una celda del honeycomb	80
Tabla 40 Características de una celda del panel	80
Tabla 41 Información para el cálculo de la longitud del honeycomb.....	81
Tabla 42 Información para el cálculo de la porosidad del honeycomb	81
Tabla 43 Caracterización del túnel de viento según el área de la cámara de ensayos	82
Tabla 44 Característica de la relación de área del difusor	82
Tabla 45 Especificaciones de las componentes de la codificación para el registro de sus datos	83
Tabla 46 Otros componentes del script.....	84
Tabla 47 Componentes de modificación para el cálculo de la longitud del difusor	85
Tabla 48 Estructura del túnel de viento planteado.....	86

Tabla 49 Visualización de opciones según tipo de adherencia	89
Tabla 50 Propiedades de impresión para el objeto de contracción	92
Tabla 51 Perfil de ajuste para la cámara de ensayo	94
Tabla 52 Perfiles de impresión del difusor	95
Tabla 53 Comparación de fabricación de piezas	96
Tabla 54 Propiedades del material PLA	96
Tabla 55 Características principales del IDE Arduino.....	98
Tabla 56 Características generales del sensor barométrico 280	101
Tabla 57 Información para el cálculo de la presión atmosférica	105
Tabla 58 Información para el cálculo de la densidad del aire (método 1)	106
Tabla 59 Propiedades de un gas ideal de aire	106
Tabla 60 Información para el cálculo de la constante de gas.....	107
Tabla 61 Información para el cálculo de la densidad del aire (método 3)	107
Tabla 62 Información para el cálculo de la velocidad sónica (método 2)	108
Tabla 63 Información para el cálculo del número de Mach	109
Tabla 64 Caracterización del flujo	109
Tabla 65 Información para el cálculo de la velocidad de entrada en la contracción	111
Tabla 66 Velocidad en la contracción en relación a la variación de su área.....	112
Tabla 67 Trayectoria de velocidad en la tobera	113
Tabla 68 Información para la ecuación de la velocidad de salida del difusor	115
Tabla 69 Datos para la verificación de la velocidad alternante en el difusor	116
Tabla 70 Información para la fórmula de la presión a la salida de la contracción.....	118
Tabla 71 Distribución de presiones en la contracción	120
Tabla 72 Datos para el trazo de la línea de presión en la contracción	121
Tabla 73 Información para el cálculo de los coeficientes de presión en la tobera.....	122

Tabla 74 Gradientes de presión en relación a las áreas totales a lo largo de la contracción.	123
Tabla 75 Información para el cálculo de la presión a la salida del difusor.....	125
Tabla 76 Variación de presiones en relación a un tramo definido en el difusor.....	125
Tabla 77 Crecimiento de la presión en el difusor	127
Tabla 78 Propiedades del aire a una presión de 1 atmósfera	128
Tabla 79 Información para el cálculo del número de Reynolds en la cámara de decantación	128
Tabla 80 Información para el cálculo del número de Reynolds en la celda del panel.....	129
Tabla 81 Información para el cálculo del número de Reynolds en la salida de la contracción	130
Tabla 82 Información para el cálculo del número de Reynolds en la sección de prueba	130
Tabla 83 Información para el cálculo del número de Reynolds a la salida del difusor	131
Tabla 84 Rugosidad de la tubería según el tipo de material	132
Tabla 85 Información para el cálculo de la rugosidad relativa del material	133
Tabla 86 Condición de validez de la ecuación propuesta por Swamee y Jain.....	133
Tabla 87 Información para el cálculo del factor de fricción de la cámara de ensayo.....	133
Tabla 88 Interpolación de datos para la determinación del factor de fricción f'	135
Tabla 89 Método iterativo de Newton – Raphson para el valor de fricción	135
Tabla 90 Comparativa entre métodos para hallar el factor de fricción.....	136
Tabla 91 Información para el cálculo del factor de fricción en la sección de decantación ..	136
Tabla 92 Información para el cálculo del factor de fricción en el panel.....	137
Tabla 93 Información para el cálculo del factor de fricción a la salida del difusor.....	138
Tabla 94 Información para el cálculo del coeficiente de pérdida	140
Tabla 95 Información para el cálculo del coeficiente de fricción del cuerpo del panel	141
Tabla 96 Información para el cálculo del coeficiente de pérdida del panel.....	142

Tabla 97 Información para el cálculo del coeficiente del factor de fricción promedio	142
Tabla 98 Información para el cálculo del coeficiente de pérdida de la contracción	143
Tabla 99 Información para el cálculo del coeficiente de pérdida de la sección de prueba ...	144
Tabla 100 Información para el cálculo del coeficiente de fricción del cuerpo del difusor ...	145
Tabla 101 Información para el cálculo del coeficiente de pérdida de la sección de decantación	147
Tabla 102 Información para el cálculo de la pérdida por fricción en el honeycomb.....	148
Tabla 103 Información para el cálculo de la pérdida en la contracción	148
Tabla 104 Información para el cálculo de la pérdida total en la sección de prueba	149
Tabla 105 Información para el cálculo de la pérdida total en el difusor.....	150
Tabla 106 Pérdidas totales en el túnel de viento	151
Tabla 107 Información para el cálculo del flujo másico de la sección de ensayo	152
Tabla 108 Información para el cálculo del gasto volumétrico.....	152
Tabla 109 Información para el cálculo de la potencia de suministro del ventilador	153
Tabla 110 Datos para la relación de la gráfica presión, velocidad y distancia en la contracción.....	154
Tabla 111 Datos para la relación de la presión, velocidad y el área en el cono divergente..	156
Tabla 112 Caracterización de los tipos de flujos presentes en el sistema.....	157
Tabla 113 Detalles de la malla.....	158
Tabla 114 Otros detalles de la malla	158
Tabla 115 Configuración de los dominios	159
Tabla 116 Configuración de las condiciones de Entrada.....	160
Tabla 117 Configuración de las condiciones de Salida	161
Tabla 118 Configuración del límite Pared	161
Tabla 119 Propiedades del material (aire)	161

Tabla 120 Condiciones a la entrada del modelo	162
Tabla 121 Condiciones a la salida del modelo.....	162
Tabla 122 Condiciones de la pared del modelo	162
Tabla 123 Parámetro de velocidad.....	171
Tabla 124 Diferencias entre métodos para la toma de velocidad	172
Tabla 125 Parámetro de temperatura	172
Tabla 126 Diferencias entre métodos de la variable temperatura.....	173
Tabla 127 Parámetro de Presión	174
Tabla 128 Diferencias de presión entre los métodos de aplicación	174
Tabla 129 Características primarias del laminador.....	199
Tabla 130 Patrones de relleno.....	199
Tabla 131 Características generales de la impresora Tenlog TL-D5.....	199
Tabla 132 Details of Mesh.....	208
Tabla 133 Other details of Mesh.....	208
Tabla 134 Domains Setting.....	208
Tabla 135 Inlet Boundary Setting	208
Tabla 136 Outlet Boundary Setting	208
Tabla 137 Wall Boundary Setting.....	209
Tabla 138 Conditions of Velocity Inlet.....	209
Tabla 139 Conditions of Pressure Outlet	209
Tabla 140 Conditions of Wall Zone.....	209
Tabla 141 Características del anemómetro de hélice.....	212

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Relación de bloqueo en la cámara de pruebas	18
Ecuación 2: Relación ancho – alto.....	18
Ecuación 3: Perímetro mojado de un ducto cuadrangular	18
Ecuación 4: Diámetro hidráulico para tuberías no circulares	19
Ecuación 5: Diámetro hidráulico para sección no circular - cuadrada	19
Ecuación 6: Longitud de la cámara de ensayo.....	20
Ecuación 7: Relación de contracción del cono de convergencia	20
Ecuación 8: Longitud de la contracción según criterio.....	21
Ecuación 9: Principio polinomial de 3 ^{er} orden	21
Ecuación 10: Principio polinomial de 5 ^{to} orden	21
Ecuación 11: Principio polinomial de 7 ^{mo} orden	21
Ecuación 12: Relación no adimensional de la distancia de la contracción.....	21
Ecuación 13: Radio hidráulico del área de entrada del difusor	22
Ecuación 14: Radio hidráulico del área de salida del difusor.....	22
Ecuación 15: Ángulo de expansión de semi – apertura del difusor.....	22
Ecuación 16: Número de celdas del panel	23
Ecuación 17: Diámetro hidráulico de una celda del panel.....	23
Ecuación 18: Relación de la longitud del panel y el diámetro hidráulico de la celda	23
Ecuación 19: Porosidad del panel	24
Ecuación 20: Presión atmosférica.....	24
Ecuación 21: Densidad del aire	25
Ecuación 22: Densidad del aire (2 ^{do} método)	25
Ecuación 23: Densidad del aire (3 ^{er} método)	25
Ecuación 24: Velocidad del sonido	26

Ecuación 25: Velocidad sónica (2do método)	26
Ecuación 26: Número de Mach	26
Ecuación 27: Ecuación de continuidad para cualquier fluido.....	27
Ecuación 28: Ecuación de Continuidad	28
Ecuación 29: Rapidez de flujo de masa	28
Ecuación 30: Ecuación de Bernoulli para flujo estacionario e incompresible	28
Ecuación 31: Ecuación de Bernoulli para campo de flujo irrotacional	28
Ecuación 32: Ecuación de Bernoulli sin efectos gravitacionales	29
Ecuación 33: Presión dinámica.....	29
Ecuación 34: Coeficiente de presión en la boquilla convergente	29
Ecuación 35: Número de Reynolds para secciones circulares.....	30
Ecuación 36: Número de Reynolds para secciones no circulares.....	30
Ecuación 37: Factor de fricción para régimen laminar.....	31
Ecuación 38: Factor de fricción para régimen turbulento desarrollo por P.K. Swamee y A.K. Jain	32
Ecuación 39: Factor de fricción para régimen turbulento desarrollada por S. E. Haaland.....	32
Ecuación 40: Factor de fricción para régimen turbulento desarrollado por Colebrook – White	32
Ecuación 41: Pérdida mayor del ducto	33
Ecuación 42: Pérdida menor del ducto	33
Ecuación 43: Pérdida de carga total.....	33
Ecuación 44: Caudal másico.....	34
Ecuación 45: Razón de flujo volumétrico.....	34
Ecuación 46: Potencia necesaria en un circuito	34
Ecuación 47: Viscosidad del aire.....	38

Ecuación 48: Densidad del aire	38
Ecuación 49: Coeficiente de arrastre ponderado	40
Ecuación 50: Diferencia de velocidad	41
Ecuación 51: Variabilidad de resistencia.....	42
Ecuación 52: Tiempo de resolución.....	56
Ecuación 53: Área frontal de un vehículo	58
Ecuación 54: Área transversal de la cámara de ensayos.....	59
Ecuación 55: Ancho de la cámara de prueba.....	59
Ecuación 56: Ancho de la cámara de ensayos (2 ^{da} forma)	60
Ecuación 57: Altura de la cámara de prueba	60
Ecuación 58: Altura de la cámara de prueba (2 ^{da} forma).....	60
Ecuación 59: Área a la entrada de la contracción	63
Ecuación 60: Área a la salida de la contracción	63
Ecuación 61: Ancho del área de entrada de la contracción	64
Ecuación 62: Altura del área de entrada de la contracción.....	65
Ecuación 63: Longitud de la contracción	65
Ecuación 64: Coordenada axial en dirección a la corriente de flujo	66
Ecuación 65: Relación de las coordenadas para determinar el punto coincidente de los radios de la contracción	69
Ecuación 66: Anchura en la entrada del difusor	70
Ecuación 67: Altura en la salida del difusor	70
Ecuación 68: Diámetro hidráulico para una tubería circular	71
Ecuación 69: Longitud del difusor.....	73
Ecuación 70: Ancho de la cámara de estabilización.....	74
Ecuación 71: Altura de la cámara de estabilización	75

Ecuación 72: Área del panal	75
Ecuación 73: Área de una celda del panal	76
Ecuación 74: Área de un polígono hexagonal regular	77
Ecuación 75: Perímetro de un polígono hexagonal regular	77
Ecuación 76: Apotema de un polígono hexagonal regular	77
Ecuación 77: Área de un polígono hexagonal regular (2 ^{da} forma)	78
Ecuación 78: Lado de un polígono hexagonal regular	79
Ecuación 79: Altura de la celda del panal.....	79
Ecuación 80: Longitud total del panal	81
Ecuación 81: Conste de un gas	106
Ecuación 82: Velocidad a la entrada de la contracción	110
Ecuación 83: Velocidad a la salida de la contracción.....	111
Ecuación 84: Velocidad a la salida del difusor.....	115
Ecuación 85: Presión a la salida de la contracción (Ecuación de Bernoulli).....	118
Ecuación 86: Rugosidad relativa	132
Ecuación 87: Factor de fricción desarrollada por S. E. Haaland (fórmula simple)	134
Ecuación 88: Factor de fricción desarrollado por Colebrook – White (fórmula simple)	134
Ecuación 89: Coeficiente de pérdida en la cámara de estabilización de ducto cilíndrico	139
Ecuación 90: Coeficiente de pérdida en la cámara de estabilización de ducto rectangular..	139
Ecuación 91: Coeficiente de pérdida en la cámara de estabilización de ducto cuadrado	140
Ecuación 92: Coeficiente de fricción del cuerpo del panal para $Re \leq 275$	140
Ecuación 93: Coeficiente de fricción del cuerpo del panal para $Re > 275$	141
Ecuación 94: Coeficiente de pérdida del honeycomb.....	141
Ecuación 95: Coeficiente del factor de fricción promedio en la contracción	142
Ecuación 96: Coeficiente de pérdida de la contracción	143

Ecuación 97: Coeficiente de pérdida de la sección de prueba	144
Ecuación 98: Relación entre áreas del difusor	144
Ecuación 99: Coeficiente de fricción del cuerpo del difusor	145
Ecuación 100: Coeficiente del factor de pérdida para la sección transversal del difusor con forma circular	146
Ecuación 101: Coeficiente del factor de pérdida para la sección transversal del difusor con forma cuadrada	146
Ecuación 102: Coeficiente de pérdida de expansión	146

CAPÍTULO I. Planteamiento de la investigación

1.1 INTRODUCCIÓN

El estudio aerodinámico cada vez juega un rol clave en el diseño y la construcción de elementos, siendo uno de sus principales objetivos, el poder sobrellevar la fuerza del viento que estará en contacto con el sólido, de tal manera que el flujo sea usado a favor del objeto. Los modelos que pueden ser analizados en un túnel de viento, están relacionados desde la manufacturación de edificios hasta vehículos que serán implementados en competencias, estos primero inician por un proceso de diseño, donde se considera normas y reglamentaciones que se requiere efectuar previo a ensayar su comportamiento en el banco de pruebas, además el investigador podría considerar aplicar mejoras en un modelo ya existente.

El mercado mundial en relación al modelaje del automóvil y la parametrización digital, es cada vez más competitivo, la comercialización de programas CAD/CAM forman parte de esa lista, por lo tanto, está previsto que para el año 2026, la industria alcance una valoración estimada en los \$50.000 mil millones de dólares estadounidenses (TheExpressWire, 2022).

Los softwares de representación gráfica tienen la objetividad de cumplir expectativas para satisfacer diversas necesidades que requiera suplir el diseñador, y permiten ofrecer resultados basados en los estudios dinámicos.

El portal TheExpressWire describe a través de la revista Digital Journal, los principales tipos y desarrolladores con mayor índice de distribución de softwares aplicados en el ámbito ingenieril, los cuales se muestran en la Tabla 1 y en la Tabla 2.

Tabla 1

Tipos de softwares de mayor aplicación

Categoría de Software para Ingeniería				
1	2	3	4	5
CAD	CAM	CAE	AEC	EDA

Tomado de: (TheExpressWire, 2022)

Tabla 2

Marcas de software de mayor preferencia en el mercado de las ingenierías

Principales desarrolladores de software de diseño y simulación				
Bentley	MSC Software	Dassault Systemes	Autodesk	Synopsys
IBM	SAP	Ansys	Geometric	Siemens PLM Software

Tomado de: (TheExpressWire, 2022)

1.2 PROBLEMA

1.2.1 Descripción del problema

Dentro del entorno nacional automotriz, actualmente no se dispone de los avances tecnológicos suficientes para la instalación de equipos tales como: motor generador de flujo (ubicado en la entrada del túnel de viento), sala de control para la recepción de datos, entre otros elementos que posibiliten llevar a cabo la elaboración de pruebas aerodinámicas con modelos de vehículos a tamaño real, razón por la cual se hace factible involucrarse en el campo de diseño y fabricación de túneles de viento para prototipos vehiculares con reducción de escala, teniendo en consideración que su construcción puede resultar de bajo costo, mejor compatibilidad en espacios reducidos y de fácil acceso a los materiales que lo componen, por lo que, se cuenta con la posibilidad de estudiar más modelos escalados por el método de simplificación en comparación con las pruebas a escala real 1:1, las mismas que generalmente albergan un presupuesto más ajustado, requiriendo la intervención de personal numeroso y un extenso dimensionamiento del terreno para lograr la finalidad del estudio; es así que, debido al factor tiempo – economía, los países industrializados cada vez se encuentran empleando las pruebas de comportamiento aerodinámico en túneles de viento de tamaño compacto que permitan alcanzar resultados en beneficio de la investigación dinámica y mejoras para el desplazamiento del vehículo en función a la maniobrabilidad, eficiencia en uso de consumo energético y la estabilidad sobre la calzada.

En planteles universitarios del ámbito internacional, cada vez son más demandantes la importación de maquetas tipo túnel de viento, que forma parte del contenido pedagógico para que el estudiante formalice un juicio a medida de la experimentación aerodinámica en objetos a escala por reducción, sin embargo, estos tipos de banco de ensayos hasta la actual fecha, ofrece un valor de venta elevado, lo que complica la fácil implementación en todos los sistemas educativos.

Ante lo expuesto anteriormente, la aplicación del prototipo túnel aerodinámico conllevará a regirse al nivel de estudio y contenido que las cátedras mundiales están suscitando en las aulas, siendo esto el motivo de necesidad para instaurar este instrumento en la carrera de Ingeniería Automotriz, que para la formación profesional del estudiante se procede a cimentar en cada semestre proyectos finales e integradores, que en su mayoría están ligados a competiciones automovilísticas: monoplazas, biplaza y multiplaza, donde el aire es uno de los factores principales a tomarse en cuenta, por lo cual, el túnel de viento podría intervenir como una

herramienta capaz de permitir la observación, simulación e interpretación del comportamiento de diseño del modelo que ha sido planificado, de tal manera que el alumno pueda determinar la viabilidad de su prototipo previo a su fabricación.

En adición a lo señalado, es necesario confeccionar y establecer una maqueta didáctica que minimice en lo posible el mayor uso de recursos en su elaboración, ya que de momento en las instalaciones de la carrera no se posee de una herramienta que satisfaga la ejecución de ensayos aerodinámicos, y que por consiguiente sirva para consumir estudios en base a los resultados de aprendizaje que se requiere obtener en la asignatura de Dinámica del Automóvil, de acuerdo a los objetivos planteados en su plan analítico, por el cual se abre la posibilidad de efectuar actividades de prácticas estudiantiles con la inducción de un banco de ensayos tipo túnel de viento, siendo además una estrategia metodológica para convalidar la enseñanza técnica – teórica, permitiendo que el estudiante logre alcanzar estos dos factores importantes para el pleno desarrollo académico, y que a su vez pueda generar un criterio vinculado con el entorno de la aerodinámica, a través de la visualización del comportamiento del flujo generado (simulación de viento) sobre el modelo de vehículo a escala.

1.2.2 Antecedentes

Como se ha expuesto en las secciones anteriores, diferentes áreas de la ingeniería recurren a ensayos experimentales, que en la mayoría son efectuados sobre bancos de prueba, los mismos que permitan diagnosticar y concluir sobre el planteamiento de prototipos previo a su fabricación.

Entre las herramientas para desempeñar pruebas experimentales en el campo de la aerodinámica vehicular, se encuentra el túnel de viento, que en su principio fue idealizado para usos netamente aeronáuticos, y al transcurrir el pasar del tiempo ha sido aceptada su aplicación por otras ramas de investigación, en la que actualmente se ha otorgado un mayor vínculo dentro del campo automotriz para obtener información sobre el impacto del flujo al aire en el desplazamiento del vehículo.

La Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca, particularmente cuenta con un túnel de viento de marca Armfield de modelo C15-10, instalado en los laboratorios del área de Mecánica de Fluidos de la carrera de Ingeniería Mecánica, la misma que ha permitido efectuar trabajos documentativos acerca del estudio del flujo de aire en objetos a escala; por su parte la Sede Guayaquil, por el momento no dispone de esta instrumentación, para lo cual sería oportuno llevar a cabo una investigación de diseño y manufacturación acerca del banco de ensayos

aerodinámico, que permita dar apertura a su implementación en el área de estudio y experimentación automotriz.

Existen especificaciones para la construcción del prototipo, esto es efectuado a través de ecuaciones matemáticas que establecen cálculos de dimensionamiento, apertura, entre demás observaciones importantes para que el modelo a construir sea relativo, a estas especificaciones se suman normativas de medición, como la SAE J2071 que refiere a los datos de diseño y métodos de pruebas realizados en un túnel de viento de garganta abierta (del término en inglés *open-throat*) para automotores, adicionalmente se dispone de la SAE J1594 que induce a que se efectúe de manera adecuada la expresión de los términos aerodinámicos (SAE Internacional, 2022).

La normativa internacional ISO 17713-1 permitirá establecer indicaciones para la medición del flujo en un túnel de viento a través del anemómetro de hélice o de copa, ambos ofrecen el mismo principio de medición, sin embargo, su diferencia radica en la forma constructiva de operación y rotación, siendo la mayor diferencia que el de tipo copa no logra ofrecer la dirección de donde se dirige el viento. Cabe destacar que la norma ISO 17713-1 coincide con la norma americana ASTM con denominación alfanumérica D5096, no obstante, el reglamento ISO dispone de un contenido más amplio en el cual se hace mención sobre la adquisición de velocidad y temperatura del flujo regulado mediante parámetros de posición del dispositivo, ubicación de toma de datos entre otras variantes.

1.2.3 Importancia y alcances

Se hace énfasis la intención de desarrollar un prototipo tipo túnel de viento, que al poner en marcha su funcionamiento pueda adquirir datos que estén relacionados al entorno de la dinámica vehicular, de esta manera servirá como sustento académico y soporte para proyectos de experimentación en la carrera de Ingeniería Automotriz, Sede Guayaquil.

Se tomará en cuenta las consideraciones y recomendaciones experimentales planteadas en las aportaciones de los investigadores en referencia al entorno de la aerodinámica, además otro de los enfoques que será ampliamente considerado, es el factor de la viabilidad y disposición de los recursos a bajo costo, para que la comunidad académica pueda replicar y repotenciar la temática.

La impresión por deposición fundida asistirá en la manufacturación de los elementos que conforman al prototipo, de la misma forma, esta técnica de fabricación será utilizada para la

obtención de objetos a escala 1:20 que será estudiado por parte de los estudiantes en referencia al comportamiento de la corriente de aire cuando entra en fricción con el modelo ingresado a la cámara de pruebas del túnel.

A través de la implementación de sensores, de tipo análoga y digital como: dos sensores de temperatura y humedad AM2301 posicionados en la zona de entrada y salida de la cámara de pruebas, cuatro sensores de presión MF01 situados en la zona inferior del vehículo, tres sensores de presión barométrica BMP280 ubicados separadamente en tres puntos que conforman el perfil del objeto a estudiar, y un sensor de revoluciones LM393 para el motor monofásico, que a través de una hélice de giro invertido actuará como ventilador extractor para la salida del flujo. Estos sensores serán instalados en la maqueta didáctica y a su vez proporcionarán resultados, que faciliten así, la obtención de datos para la investigación, de tal manera el presente trabajo dará apertura a nuevas propuestas de ensayos y experimentación en el marco de la aerodinámica, permitiendo enriquecer el área de conocimientos.

Además, los dispositivos de sensado serán conectados a una unidad de procesamiento de datos, para esto se integrará al circuito, un microcontrolador ATmega328P, que previamente se cargará la programación desarrollada en el software IDE Arduino, para que de esta manera se pueda organizar la información recolectada por los sensores.

El prototipo para pruebas aerodinámicas, será proyectado con la capacidad de ser transportable, para facilitar su movilización hacia eventos con afinidades académicas, dando espacio a que demás estudiantes o público en general, puedan integrar su interés al ámbito de la aerodinámica.

La apertura del prototipo amparará también a los proyectos integradores de ciclo donde la aerodinámica deberá tomarse en consideración, por el cual se incentivará a que los alumnos puedan experimentar sus propuestas de diseño y canalizar información para validar su desarrollo.

1.2.4 Delimitación

El presente Proyecto Técnico se lleva en efecto previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz en la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Guayaquil, el mismo que vincula la creación de un banco formativo para estudio aerodinámico, que a su vez resulte de interés para los estudiantes de la carrera.

Espacial

La fundamentación de esta actividad de titulación se encuentra encaminada con la implementación de un prototipo capaz de cumplir con los aspectos básicos de diseño de un túnel viento según la normativa SAE J2071 y procedimientos numéricos, que a su vez posibilite el estudio e investigación de objetos frente al fenómeno aire como fluido de impacto.

El proyecto está destinado a realizarse en la carrera de Ingeniería Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Guayaquil y se hará uso del laboratorio de Manufactura Aditiva, asentado en la misma sede, en la cual será posible la construcción del prototipo, ensamble e instalación del circuito electrónico.

Temporal

El desarrollo del banco tipo túnel de viento para la adquisición de datos dinámicos, será desempeñado durante el periodo 61, en su año lectivo 2022 – 2023, acorde al calendario académico de la UPS.

Académica

Los autores de la presente documentación han tomado la decisión de elaborar un Proyecto Técnico bajo la dirección del Tutor de trabajo de grado.

Las exigencias para emprender esta actividad se estarán cumpliendo en función de los objetivos planteados, los cuales están orientados a denotar la planificación, experimentación, análisis e implementación de un banco aerodinámico para el sector académico, en aporte a la mejora de la sabiduría estudiantil.

En concesión del cumplimiento a la veracidad de los procedimientos utilizados en este proyecto, se sustentará normativas, referencias bibliográficas de libros y artículos científicos factibles para la acreditación del diseño y adquisición de datos en el túnel de viento.

1.3 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un banco didáctico tipo túnel de viento de bajo costo para la realización de ensayos aerodinámicos en modelos de vehículos a escala 1:20 por medio de la aplicación de metodologías analíticas y experimentales.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Compilar los fundamentos teóricos y metodológicos para el diseño y construcción de un banco de ensayo aerodinámico para vehículos a escala por medio de la caracterización de ecuaciones matemáticas ejecutadas en un software de cálculo numérico.
- Desarrollar la metodología a utilizar para el proceso constructivo y la toma de datos, basado en normativas.
- Analizar el flujo de la masa de aire en el túnel de viento mediante la medición de su velocidad real y validación de su compartimiento por medio de simulación paramétrica CAE, aplicando un método estadístico.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Dinámica del vehículo

La dinámica en los vehículos se focaliza principalmente en el comportamiento dinámico respecto a la interacción del conductor en los sistemas de control, considerando a la vez los factores intervinientes del medio: calzada y aire, y además la dinámica se encarga de dar interpretación a lo que ha sido obtenido como resultado de sobrellevar el estudio del movimiento del automóvil sobre la superficie de rodadura (Aparicio Izquierdo et al., 2001, p. 8).

La influencia del aire produce una interactividad considerable en el comportamiento del automóvil, esto da lugar a que el flujo ejerza una resistencia que actúa de forma opuesta al movimiento del vehículo, lo que resulta un aspecto imprescindible a destacar en cuanto a determinar la potencia consumida a velocidades medias y altas. También, influye en el comportamiento del automóvil, una fuerza sustentadora, que ocurre de manera perpendicular al viento relativo (viento generado tras el movimiento o desplazamiento de un objeto) sobre el perfil del vehículo, y que tiene una incidencia negativa sobre el mismo, exceptuando el caso en el que se ejecute el montaje de dispositivos aerodinámicos como presas de aire delanteras e interceptores posteriores, los cuales podrían neutralizar o invertir el sentido de la fuerza de sustentación (Meseguer Ruiz & Sanz Andrés, 2010).

Por tanto, al momento de diseñar un vehículo, es importante que se defina las condiciones del medio (aire, condiciones ambientales, superficie de rodadura, etc.) que estarán relacionadas a su comportamiento, debido a que, si éste opera fuera de aquellas condiciones, conllevaría a que el comportamiento del automóvil se aísle de lo anhelado (Aparicio Izquierdo et al., 2001, p. 6).

2.2 Aerodinámica

La aerodinámica de un automóvil presenta como términos de estudio la comprensibilidad de los diversos efectos que causa el aire sobre un objeto en movimiento, y determinar la manera en que se conduzca a lograr que tales efectos muestren condiciones favorables sobre el vehículo. Estos efectos están ligados a dos tipos de flujo:

- Flujo de aire externo al automóvil.
- Flujo de aire que atraviesa los compartimentos del automóvil.

El flujo de aire externo al vehículo, provoca zonas de presión y rozamiento viscoso con en las superficies o paredes exteriores del automóvil, lo que esto además hace que se cree esfuerzos que interceden en el avance del vehículo, las cargas sobre las llantas, y podría incluso interferir en la estabilidad del auto; este primer fenómeno dependerá mucho del diseño aerodinámico que posee el vehículo. El flujo de aire interno o flujo que circula a través de los comportamientos del vehículo, está relacionada con la aireación del habitáculo y la refrigeración del motor (Aparicio Izquierdo et al., 2001, pp. 119 - 120).

El mundo de la aerodinámica vehicular se ha acogido a los estudios, conocimientos y experticia del ámbito aeronáutico, aunque cabe destacar que ambas áreas realizan procedimientos distintos; en el caso del diseño aerodinámico de un avión, generalmente se empieza desarrollando una modelización de carácter matemático, en la que se incluye la aplicación de métodos numéricos, luego de ello conlleva a efectuarse una fase experimental, mientras que para el entorno de los automóviles, particularmente el diseño se ejecuta sin estos protocolos (Aparicio Izquierdo et al., 2001, p. 120).

El crecimiento de los estudios de tipo aerodinámico, ha generado que se multiplique exponencialmente la necesidad de llevar a cabo estos estudios en un túnel de viento en diversos campos de la ingeniería, en la que además los túneles aerodinámicos actúan como una herramienta primaria para producir conocimiento (Meseguer Ruiz & Sanz Andrés, 2010, p. 309).

2.2.1 Indicios de la aerodinámica en la Fórmula 1

La aparición de los alerones en los autos de Fórmula Uno surgieron en 1968, cuando Colin Chapman introdujo los alerones delanteros y traseros en el Lotus 49 para lograr una carga aerodinámica, lo que resaltó la importancia del diseño aerodinámico de un auto de carreras en su desempeño, aquella carga aerodinámica puede aumentar las fuerzas laterales y tangenciales máximas del neumático, lo que da como resultado un incremento en la velocidad del automóvil en las curvas y una mejora en el rendimiento de aceleración y frenado del automóvil, en adicción a esto, la influencia más importante de la reducción de la resistencia es el incremento de la velocidad máxima del automóvil (Katz y Plotkin, 2001).

El llamado centrado en el alerón delantero, es un dispositivo aerodinámico que consiste en un ala de ángulo de ataque negativo con dispositivos adicionales, como flaps, flaps Gurney o endplates; posee dos características principales tienen una influencia crítica en su diseño: la proximidad del asfalto (efecto suelo) y los neumáticos, sus objetivos radican en generar una

carga aerodinámica (25-30% de la carga aerodinámica total del automóvil) en la parte delantera del automóvil con alta eficiencia aerodinámica, reducir la resistencia generada en las ruedas delanteras y canalizar el flujo de aire a los componentes más traseros, por lo tanto, los alerones delanteros de los autos de carreras poseen una relación sustentación-resistencia muy alta (Obeid et al., 2017).

2.3 Túnel de viento

Los túneles de viento se utilizan para simular las condiciones de vuelo de los sistemas aeroespaciales en el laboratorio. En principio, estas instalaciones incluyen un mecanismo de suministro de gas, una boquilla que transforma el gas de condiciones de reservorio a condiciones de prueba, la sección de prueba y, finalmente, en su salida cuenta con un difusor junto a un sistema de escape.

Hoy en día, este tipo de método de ensayo que permite obtener resultados de rendimiento aerodinámico, ha sido aceptado para ser empleado en el campo de la automoción, en la que cada vez se adicionan variantes de estudios a sus prototipos (Cogotti, 2008).

Las pruebas de túnel de viento son importantes, porque permiten realizar simulaciones con la proximidad de ser controladas y, por lo tanto, comprender mejor los fenómenos de física de flujo; aunque las instalaciones en tierra proporcionan información fundamental para el vuelo, ninguna instalación puede proporcionar toda la información aero-termodinámica requerida para el diseño de un vehículo. Como es bien sabido hoy en día, la duplicación de todos los parámetros característicos de vuelo (Mach, Reynolds, Damköhler, Estado del gas) en una instalación terrestre no es posible, particularmente el número de Reynolds de vuelo y los efectos de entalpía resultan complejos de reproducir (Pereira, 2011, p. 4).

2.3.1 Tipos de túneles de viento para investigación experimental

- Supersónicos, hipersónicos o de hipervelocidad (según el número de Mach y la temperatura requerida en la sección de prueba)
- De baja o alta entalpía (dependiendo de la entalpía de estancamiento del gas de entrada)
- De operación continua o de purga (en cuanto al tiempo de funcionamiento)
- De circuito abierto o cerrado (túneles de viento continuos)
- De chorro libres o cerrados

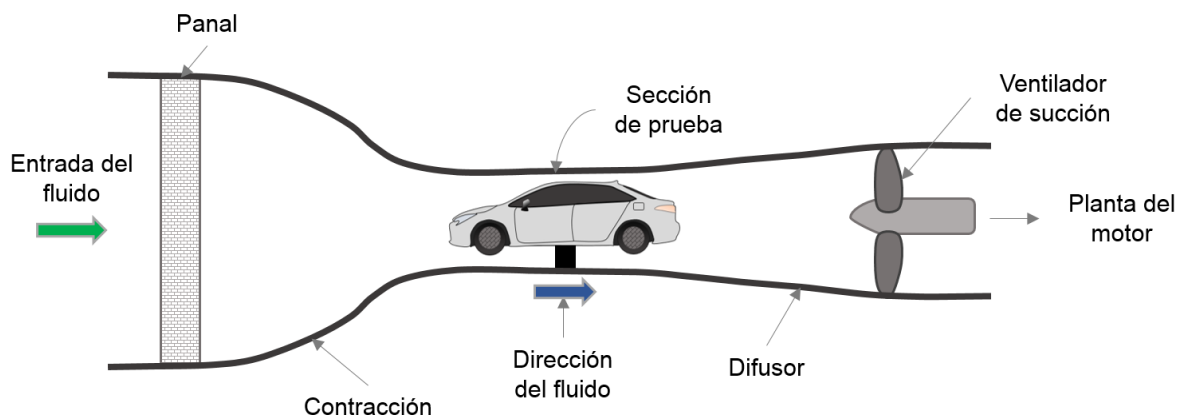
- De entrada atmosférica o de entrada de alta presión (túneles de viento de purga)
- De escape atmosférico o de vacío (túneles de viento de purga)
- De toberas planas o axisimétricas (dependiendo de la geometría de la sección de salida de la tobera)
- De una o varias boquillas (dependiendo del número de boquillas)
- De toberas de geometría fija o geometría variable
- De flujo de gas enrarecido o régimen de flujo de gas continuo (dependiendo de la densidad del gas en la sección de prueba)

2.3.2 Descripción de diferentes tipos de túneles de viento

Se puede distinguir fácilmente a un túnel de viento por el tipo de circuito que posee, la cual puede ser de circuito abierto o cerrado, en el caso del primero, se toma en cuenta que, el caudal de aire se mueve (desde el medio circundante) en dirección a la sección de enderezado de flujo, luego fluye a través del área de contracción, en donde interviene el principio o efecto de Bernoulli, que prácticamente produce que el flujo tome aceleración, para que, al llegar a la cámara de prueba, la velocidad haya incrementado, y es en esta sección donde teóricamente se percibe la velocidad más alta de todo el sistema. En la etapa de diseño, si se considera una relación de contracción que sea muy prominente, posiblemente conllevaría a que se esté dirigiendo flujos turbulentos hacia la cámara de observación; en el momento en que el caudal haya sobrepasado la anterior sección, entonces circulará por el difusor, en la que es ralentizado, y, por consiguiente, es expulsado. (Obidi, 2014, p. 64).

Figura 1

Esquema de un túnel aerodinámico de circuito abierto

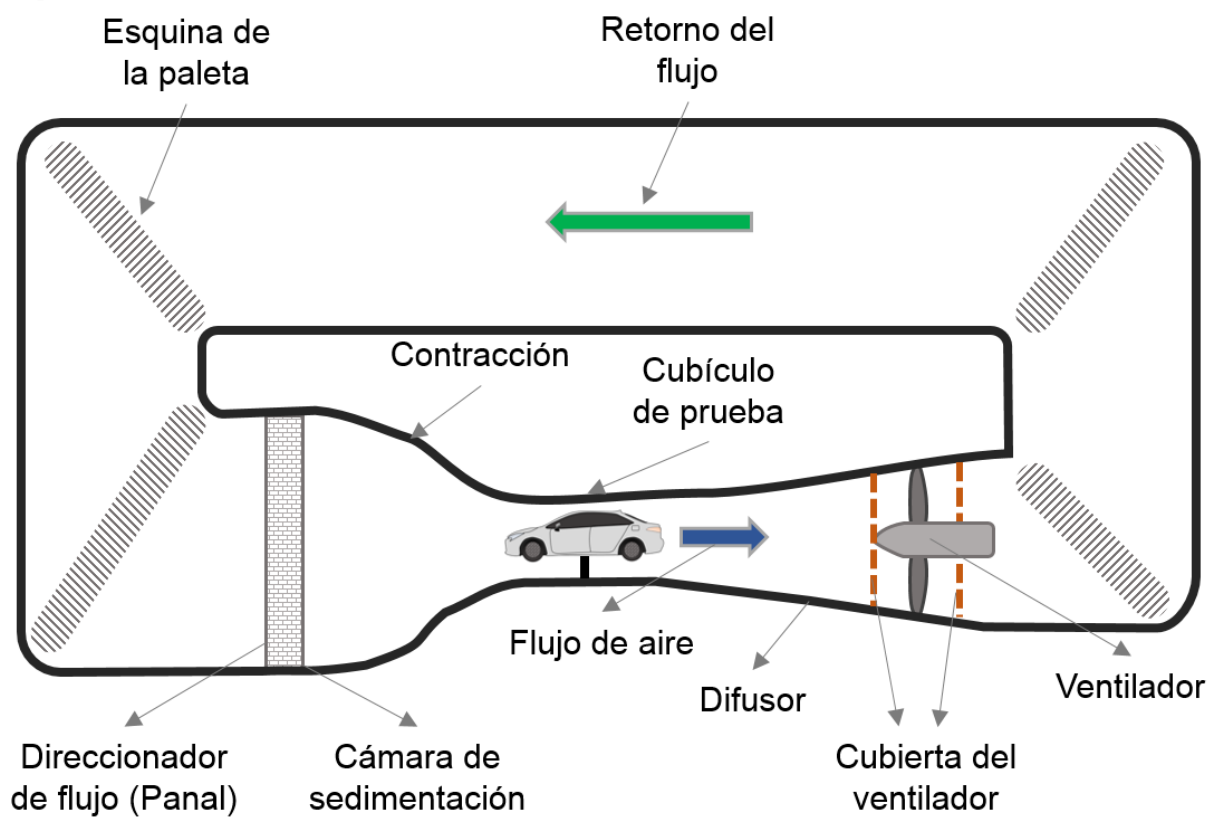


Tomado de: (Obidi, 2014, p. 64)

En cambio, los túneles de viento de circulación cerrada, son reconocidos por disponer de un mecanismo de recirculación de aire, que los contiene y los recicla; el flujo persiste sobre una misma pista o secuencia en un área totalmente cubierta. Cada vez que el caudal atraviese la cámara de ensayos, es absorbido por el ventilador, y es conducido hacia el conducto de retorno, donde a continuación llega a la sección de sedimentación, segundos antes de que ingrese a la contracción, debido a esta particularidad, la prueba se conserva de variaciones en el aire ambiente, resultando ser uno de los tipos de túneles aerodinámicos de mayor confiabilidad. También se los puede referir como circuitos sin desperdicio de aire (Obidi, 2014, p. 64).

Figura 2

Esquema de un túnel aerodinámico de circuito cerrado



Tomado de: (Obidi, 2014, p. 64)

2.3.3 Variantes de túneles aerodinámicos

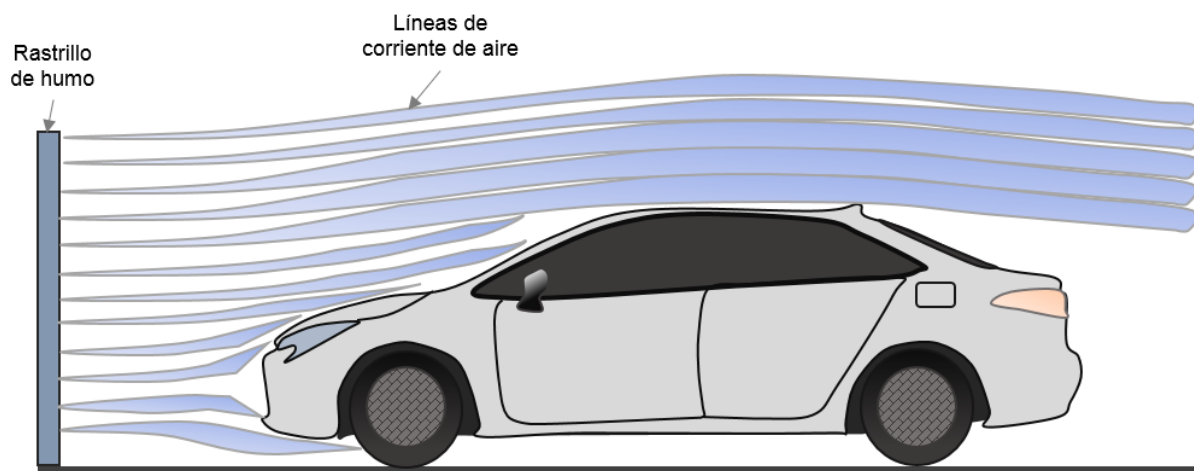
Los túneles de viento que se centran en ser destinados a la temática investigativa más que la demostrativa, tienden a incorporar varios dispositivos antiturbulencia, como es el caso de las pantallas, para poder conseguir un flujo con calidad laminar. Los túneles de circulación sin retorno y que simulan el flujo por medio de la utilización de artefactos generadores de humo, cuentan con una velocidad que por lo general es baja (Barlow et al., 1999, p. 35)

Un rastrillo inyector de humo (referido como smoke injector rake en inglés) forma parte de las técnicas aplicadas a bancos aerodinámicos, que permite de cierta manera observar la trayectoria del flujo con mayor visibilidad (Nader et al., 2020, p. 230).

Bosch (2022) comparte la idea de instaurar elementos que permitan visualizar de mejor manera las corrientes de aire sobre la cámara de pruebas, entre ellas y las más empleadas, son los rastrillos de lanza de humo, que pueden contar con una serie de tubos ubicados de manera longitudinal y adheridos a una barra fija en posición vertical, también se puede decidir usar otros métodos de apreciación de flujo, como son los hilos apoyados sobre toda la cara superficial del modelo y las luces láser (p. 527).

Figura 3

Rastrillo generador de corriente de humo



Tomado de: (Bosch GmbH, 2022, p. 527)

2.3.4 Partes de un túnel de viento

El túnel de viento se compone en un principio de una cámara estabilizadora de flujo, que, haciendo referencia a su nombre, permitirá que el aire se consolide a mejores condiciones, es decir, no ingrese de forma caótica al circuito interno. Dentro de esta cámara se puede establecer paneles tipo abeja (derivado de la palabra en inglés honeycomb) o también definido como rejilla de enderezado, la cual contribuye a disminuir el nivel de turbulencia, que de cierta manera permitirá a disuadir la estela de aire recirculante, para adquirir que el nivel de turbulencia sea bajo (Santos et al., 2016).

Inclusive se puede instalar adicionalmente pantallas, que son otro tipo de objeto filtrante, compuestos de finos alambres entretejidos, que, si son combinados entre dos o más, estos configurarán mallas, y pueden ser de tipo rectangular o cuadrada, asimismo las pantallas

cumplen con el objetivo de decrementar la turbulencia axial o longitudinal como función prioritaria en relación a la turbulencia lateral; por su parte, el panel exime al túnel de viento mayoritariamente de turbulencia lateral y en menor medida las de tipo axial (Santos et al., 2016).

Seguidamente a lo anterior, se encuentra ubicado una zona de contracción, que es donde teóricamente el caudal debe ganar una mayor aceleración previo a su ingreso a la cámara que prosigue a esta. También el túnel de viento está equipado con una cámara de prueba, la misma que posee un área transversal de cara cuadrada, y se ubica cerca del punto centro del total de su longitud, además, el túnel de viento dispone de un difusor que es adyacente a la sección o cámara de prueba y permite que se dé la desaceleración del flujo; por último, en la finalización del túnel se localiza la sección de salida y/o soporte del ventilador.

En la siguiente Tabla 3, se define los términos y/o denominaciones (lenguaje) más comunes a emplear durante el desarrollo del presente trabajo respecto a las partes generales que conforman una maqueta de túnel de viento de circuito abierto.

Tabla 3

Componentes generales del túnel de viento

Elementos del túnel de viento (Secciones)		
	Término de uso común	Sinónimos sugeridos
Sección 1	Cámara de estabilización	Antecámara Cámara o zona de sedimentación Cámara o zona estabilizadora de flujo Cámara de decantación Cámara amortiguadora Cámara de remanso Cámara de tranquilización
Sección 2	Entrada	Cono de contracción Cono de convergencia Cono de aceleración Tobera
Sección 3	Cámara de pruebas	Cámara o zona de ensayos Cámara de observación Sección de medición cerrada
Sección 4	Salida	Difusor Cono de divergencia Cono de desaceleración
Sección 5	Salida con dispositivo de ventilación	Sección de salida con extractor axial Área, zona o estructura de soporte del soplador

Tomado de: (Barlow et al., 1999)

En relación a la Tabla 3, precisamente al interior de la sección número 1, se puede instalar paneles (que son elementos internos que favorecen las condiciones de flujo) denominados

también como honeycomb, rectificador de flujo, paneles hexagonales o reja enderezadora de corriente.

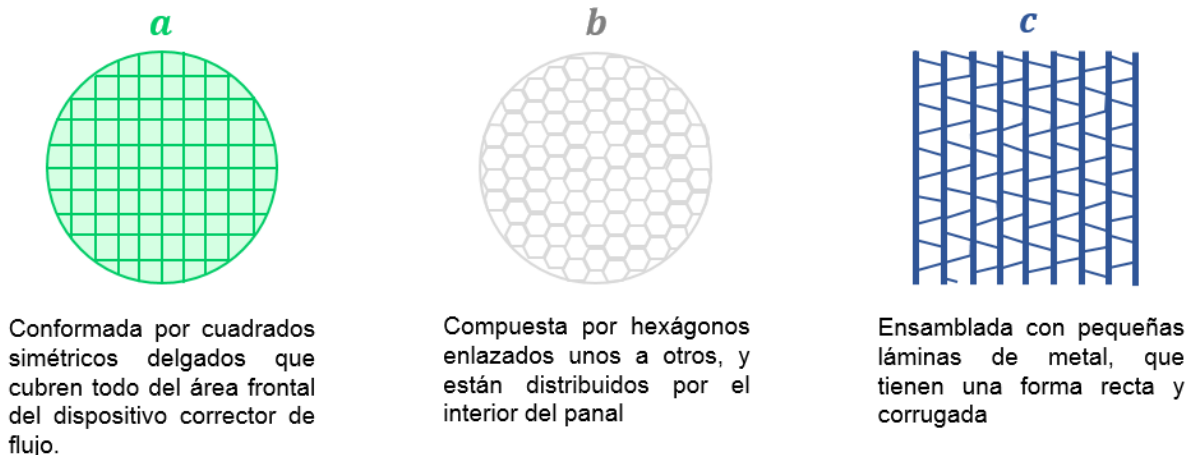
Dispositivos de acondicionamiento de flujo - Honeycombs

Un panel o estabilizador, es un dispositivo que contribuye a que el caudal de aire puede ser más paralelo, ya que al encontrarse prácticamente al comienzo del circuito del túnel de viento, este trata de atribuirle condiciones de estabilidad a los posibles vórtices que tienda a generar la masa de aire, antes de su ingreso a la cámara de la contracción y previo a su desembocadura en la sección de prueba (Prandtl, 1933, p. 5).

En la Figura 4, se muestra el aspecto frontal (en perspectiva a la dirección a la que fluye la corriente de aire) de los tipos más comunes de honeycombs empleados para configurar internamente la cámara de sedimentación.

Figura 4

Tipos de panales



Tomado de: (Prandtl, 1933, p. 35)

Sección de la Cámara de Estabilización

En un túnel de viento de circuito abierto, se puede relacionar de cierta manera las dimensiones de diseño de la cámara de amortiguación con el aspecto que toma el elemento que está cercano a esta, es decir, el área transversal de la cámara de estabilización, será idéntica a las mediciones que presente la sección transversal de la parte frontal de la cámara de contracción, por tanto, las dimensiones de ancho y alto presentarán también similitud (Mauro et al., 2017, p. 13651).

Según Barlow et al. (1999), manifiestan que para catalogar dimensionalmente a la longitud que corresponderá a la cámara de amortiguación de flujo, se podría acoger un valor

de 0,5 veces el diámetro de la sección de entrada o tobera cónica, debido a que la longitud debe ser lo suficientemente ideal en caso que se requiera albergar los paneles o pantallas que servirán para simplificar la intensidad de la turbulencia (p. 97).

Sección de la Contracción

La definición del valor adimensional de la relación de contracción a usar (R_c), es significativo, porque permitirá conocer al área delantera de la contracción, la cual es sugerido por Metha y Bradshaw (1979), y es estimada en un intervalo de común uso de entre de 6:1 a 9:1, esto de (p. 448); aquel criterio es compartido por Barlow et al. (1999), que aseguran que los valores del factor de contracción, típicamente se enfocan en el rango antes manifestado (p. 95).

Los autores Bell y Mehta (1988), han definido que, para descifrar la forma de la pared lateral de la cámara de convergencia, se debe valerse de una función con principio polinómico que integre tanto la altura del área principal y posterior, y la longitud en sentido axial de dicha cámara (p. 14).

Sección del Difusor

En la determinación del radio de la zona de entrada del difusor (R_1), se deberá identificar principalmente el diámetro hidráulico de dicha zona (D_{h1}), para luego dividir a la mitad dicho parámetro. Mientras que, el radio de la zona de salida del cono divergente (R_2), es equivalente al cociente que se obtenga al dividir el diámetro hidráulico de salida o diámetro del ventilador (D_{h2}) por dos (Barlow et al., 1999, p. 88).

2.4 Comprensibilidad de los gases

Un flujo de gas tiende a ser comprensible, cuando éste proyecta una circulación a velocidades relativamente altas, por lo que consecuentemente traerá a que se produzca efectos de significancia en las condiciones del flujo, como variación en la densidad, temperatura y presión, por tanto, el número de Mach es mayor a 0,3 (White, 2003, p. 304).

2.5 Diagrama de Moody

El ábaco de Lewis Ferry Moody, es una representación gráfica no dimensional, que es ampliamente seleccionada para hallar el valor del factor de fricción respecto al número de Reynolds y/o rugosidad relativa, en una escala logarítmica. En un inicio, la utilización de este diagrama era adjudicado a conductos redondos, sin embargo, también puede aplicarse en

tuberías de sección transversal no circular, con la restricción de que estos atribuyan la condición de poseer un diámetro hidráulico (Munson et al., 2002, p. 493).

Mott y Untener (2015) señalan que el ábaco de Moody, es uno de los métodos más comunes y convenientes para determinar manualmente el factor adimensional de fricción, no obstante, los escritores hacen alusión a que existen otras ecuaciones precisas que permiten resolver directamente el valor del factor de fricción de Darcy, principalmente estas son aplicadas en el medio computacional (p. 194).

CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN MATEMÁTICA

3.1 Criterios de dimensionamiento y diseño

3.1.1 Relación de bloqueo

El escritor Hucho (1987) insiste que la relación de bloqueo determinada entre el área proyectada por el objeto y el área de la sección transversal de la cámara de ensayos, puede considerar poseer un valor no mayor al 30%; si la relación de bloqueo posee un valor inferior, el tamaño de la cámara aumentará (p. 407).

$$R_b = \frac{A_f}{A_{ts}} \quad (1)$$

Donde:

R_b = relación de bloqueo

A_f = área frontal del objeto

A_{ts} = área de la sección de prueba

3.1.2 Relación de las dimensionalidades entre ancho y alto de la cámara de ensayo

En base a los criterios manifestados por Barlow et al. (1999), se enlaza a continuación la fórmula que permitirá obtener la relación ancho – alto de la sección de pruebas (p. 65).

$$w:h = \frac{w_{ts}}{h_{ts}} \quad (2)$$

$$1 \geq w:h \leq 1,5$$

Donde:

$w:h$ = tasa de relación ancho – alto

w_{ts} = ancho de la cámara de ensayos

h_{ts} = altura de la cámara de ensayos

3.1.3 Perímetro húmedo

Se estipula la formulación siguiente, que ha sido presentada por Mott (1996), y que es de exclusivo ejercicio para la determinación del perímetro humedecido en geometrías de tipo cuadrada (p. 227).

$$PM = 4 \cdot a \quad (3)$$

Donde:

PM = perímetro mojado

a = uno de los lados de la cámara (sea altura o ancho)

3.1.4 Diámetro hidráulico

La mayoría de las tuberías que se emplean para las actividades de transportación de fluidos, no exponen una sección transversal circular, debido a esto surge la terminología del diámetro hidráulico, que es ligado a las operaciones de cálculos referente a la mecánica de fluidos sobre conductos no circulares (Munson et al., 2002, p. 492). Según White (2003), expone que el cálculo del diámetro hidráulico en tuberías no redondas, resulta ser una aproximación excelente para el desarrollo de análisis de los flujos en una sección (p. 366).

En conductos con perfiles circulares, el término diámetro hidráulico, es atribuido al diámetro común (D) de dicha tubería, por lo que no es necesariamente indispensable acudir a desarrollar alguna formulación para calcularlo. A continuación, se establece el siguiente enunciado matemático, respecto a hallar el diámetro hidráulico apropiado a tuberías no circulares (Çengel & Cimbala, 2006, p. 324)

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{PM} \quad (4)$$

Donde:

D_h = diámetro hidráulico de la tubería

A = área trasversal de la sección

PM = perímetro humedecido

En correlación a la condición geométrica cuadrada de un ducto, también es posible aplicar una ecuación más simplificada para hallar su diámetro hidráulico, la misma que está ajustada en base a:

$$D_h = \frac{4 \cdot a^2}{4 \cdot a} \quad (5)$$

Donde:

D_h = diámetro hidráulico

a = lado de la tubería cuadrada

3.1.5 Relación de longitud de la cámara de ensayo

Barlow et al. (1999), han desarrollado la relación para adquirir la dimensión longitudinal de la cámara de ensayos (p. 68).

$$L_{ts} = D_{h_{ts}} \cdot l: dh$$

$$l: dh > 2 \quad (6)$$

Donde:

L_{ts} = longitud de la sección de prueba

$D_{h_{ts}}$ = diámetro hidráulico de la sección de prueba

$l: dh$ = tasa de relación longitud – altura de la sección

3.1.6 Relación de contracción

De acuerdo con Mehta y Bradshaw (1979) la relación del cono de contracción está determinada por la relación entre el área principal y posterior, para lo cual típicamente se vincula este criterio con la siguiente razón matemática (p. 448).

$$R_c = \frac{A_{1c}}{A_{2c}}$$

$$6 \geq R_c \leq 9 \quad (7)$$

Donde:

R_c = relación de la región de entrada y salida de la contracción

A_{1c} = área de entrada de la sección

A_{2c} = área de salida de la sección

En algunas ocasiones también se suele representar a el área de salida de la contracción como A_e (proveniente del término en inglés *exit section area*) y al área de entrada como A_i (proveniente originalmente de la palabra *inlet section area*), sin embargo, generalmente se opta por identificar a las áreas con un subíndice numérico para darle una mayor distinción.

3.1.7 Longitud de la contracción

De acuerdo al número de mallas que se vayan a instalar antes de la tobera de convergencia (precisamente dentro la cámara estabilizadora de flujo), y a la relación del área de entrada y salida (r_c) que se vaya a elegir, se podría aplicar la teoría de la relación de longitud de la contracción (mayormente cuando $r_c \geq 8$), que de forma generalizada se indica que la aplicación de esta, evita que ocurra pérdidas de presión dentro de la sección; esto particularmente está ligado a circuitos con velocidades más trascendentales que los túneles de viento de clase subsónica, para entonces, los investigadores Arifuzzaman y Mashud (2012) definen a la ecuación que apunta al principio descrito previamente como (p. 84):

$$L_c = R_{h_1} \cdot l_c : r_{h_c} \quad (8)$$

Donde:

L_c = longitud de la contracción

R_{h_1} = radio hidráulico del área a la entrada de la contracción

$l_c : r_{h_c}$ = relación longitud – radio hidráulico de la contracción (seleccionable entre 0,15 a 1)

3.1.8 Perfil lateral de la contracción mediante el uso de una ecuación con principio polinómico

Los investigadores Bell y Mehta (1988) emplearon tres tipos de fórmulas con funciones polinomiales que han permitido sobrellevar el trazo de la silueta característica de la contracción, las cuales fueron de tercer, quinto y séptimo grado, dichas ecuaciones se plasman a continuación (p. 14).

Función polinómica de 3^{er} grado:

$$H = H_i - (H_i - H_e) \cdot [-2 \cdot (X')^3 + 3 \cdot (X')^2] \quad (9)$$

Función polinómica de 5^{to} grado:

$$H = H_i - (H_i - H_e) \cdot [6 \cdot (X')^5 - 15 \cdot (X')^4 + 10 \cdot (X')^3] \quad (10)$$

Función polinómica de 7^{mo} grado:

$$H = H_i - (H_i - H_e) \cdot [-20 \cdot (X')^7 + 70 \cdot (X')^6 - 84 \cdot (X')^5 + 35 \cdot (X')^4] \quad (11)$$

Donde (válido para las tres últimas ecuaciones citadas):

H = altura según la distribución de los puntos coordenados

H_i = altura en la entrada de la contracción

H_e = altura en la salida de la contracción

X' = distancia no dimensional en sentido de la corriente, dirección y por tramo

Para determinar la relación o la distancia no dimensional del perfil de la contracción, se considera la ecuación que se especifica en breve (Bell & Mehta, 1988, p. 14).

$$X' = \frac{x}{L_c} \quad (12)$$

Donde:

X' = relación de distancia en dirección a la corriente de flujo

x = coordenada axial cartesiana

L_c = longitud total de la tobera de convergencia

Mediante varios estudios, los experimentadores antes referidos, pudieron identificar que lo más conveniente es acogerse a la función con polinomios de quinto grado, por motivo de la incidencia de pérdidas o caída de presión, y con el afán de conseguir un comportamiento de flujo menos inestable tanto al inicio como al final de la contracción (Bell & Mehta, 1988, p. 15).

3.1.9 Radios hidráulicos de las secciones del difusor

El radio hidráulico delantero, constituye uno de los parámetros ineludibles a tomar en cuenta para poder determinar la longitud del difusor, por eso, la expresión matemática que precisa tal condición según Barlow et al. (1999), es equivalente a (p. 80):

$$R_1 = \frac{D_{h1}}{2} \quad (13)$$

Donde:

R_1 = radio hidráulico en la sección de entrada del difusor

D_{h1} = diámetro hidráulico en la sección de entrada del difusor

Otro de los parámetros de cálculo importante en relación a hallar la magnitud lineal del difusor, tiene que ver con el radio hidráulico posterior de aquel componente, la misma que podrá ser determinada al tomar como referencia la siguiente expresión (Barlow et al., 1999, p. 80).

$$R_2 = \frac{D_{h2}}{2} \quad (14)$$

Donde:

R_2 = radio hidráulico en la sección de salida del difusor

D_{h2} = diámetro hidráulico en la sección de salida del difusor

3.1.10 Ángulo de expansión cónica

También denominada como ángulo de semi – apertura del difusor, la cual viene dada de la siguiente expresión (Barlow et al., 1999, pp. 80 - 81).

$$\theta_e = \arctan\left(\frac{R_2 - R_1}{L}\right) \quad (15)$$

Donde:

θ_e = ángulo cónico de semi – apertura

R_1 = radio hidráulico de la sección de entrada del difusor

R_2 = radio hidráulico de la sección de salida del difusor

L = longitud del difusor

3.1.11 Celdas de un estabilizador de flujo o panel

Mehta y Bradshaw (1979), mediante sus trabajos de experimentación que en relación al nivel de variación de velocidad que se presente en el circuito del túnel aerodinámico, se deberá seleccionar el número de celdas que constituirá al panel, que mínimamente se establece en 150 celdas por diámetro de la cámara de sedimentación, o 25000 celdas en total, esta última se efectúa en el caso que se requiera acondicionar de mejor manera el flujo, respecto a las condiciones que se susciten en la cámara; a lo anteriormente dicho se adjunta la relación siguiente (p. 447):

$$n_{hc} = 150 \text{ celdas} \cdot D_{hsc} \text{ o } n_{hc} = 25000 \text{ celdas} \quad (16)$$

Donde:

n_{hc} = número de celdas del panel (celdas reales a instalarse en el panel)

D_{hsc} = diámetro hidráulico de la cámara de sedimentación

3.1.12 Diámetro hidráulico de una celda del estabilizador de flujo

Mauro et al. (2017) señalan que, el diámetro hidráulico para una de las celdas del honeycomb, es equivalente al valor que sea obtenido al implementar la siguiente ecuación (p. 13653):

$$D_{h_{hc}} = D_{hc} \cdot \sqrt{\frac{6}{\pi \cdot \sqrt{3}}} \quad (17)$$

Donde:

$D_{h_{hc}}$ = diámetro hidráulico de la celda

D_{hc} = diámetro circunscrito a la celda

3.1.13 Relación entre la longitud del panel y el diámetro hidráulico de su celda

En señalamiento a lo manifestado por Barlow et al. (1999), se indica que habitualmente la relación entre la longitud total del panel y el diámetro hidráulico de una celda, se sitúa entre rango adimensional de 6 a 8 (p. 90).

$$\begin{aligned} l_h : D_{h_{hc}} &= \frac{l_h}{D_{h_{hc}}} \\ l_h : D_{h_{hc}} &= 6 \text{ a } 8 \end{aligned} \quad (18)$$

Donde:

$l_h \cdot D_{h_{hc}}$ = relación entre la longitud del panel y el diámetro hidráulico de la celda

l_h = longitud del honeycomb

$D_{h_{hc}}$ = diámetro hidráulico de la celda del panel

3.1.14 Relación de porosidad del panel

El nivel de porosidad es un factor que juega una función esencial en cuanto a la capacidad de poder simplificar los índices de turbulencia, típicamente la porosidad en un panel es cercana a valores mayores a 0,8; una valorización inferior de porosidad, pueda dar como resultado desfavorable, una calidad de flujo con inestabilidades (Barlow et al., 1999, p. 90). Los investigadores Arifuzzaman & Mashud (2012), relacionan a la porosidad como el coeficiente entre el área real en la transita el fluido y el área global del panel (p. 85).

$$\beta_h = \frac{\Omega_f}{\Omega_t} \quad (19)$$

Donde:

β_h = porosidad del panel

Ω_f = área de la sección transversal en la que se desplaza el flujo (área real)

Ω_t = área total de la sección transversal del panel

3.2 Principios de la mecánica de fluidos

3.2.1 Presión atmosférica o barométrica

La fórmula que permite encontrar la presión barométrica, está compuesta por la multiplicación entre la presión normal al nivel mar y la relación de la constante o función exponencial de Leonhard Paul Euler, que a su vez esta está sujeta a elevar y agrupar con el signo menos (–) otros datos necesarios para el cálculo del parámetro de la presión (Berberan Santos et al., 1997, p. 404).

$$P = p_0 \cdot e^{\left(-\frac{m \cdot g \cdot h}{k \cdot T}\right)} \approx P = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{m \cdot g \cdot h}{k \cdot T}\right) \quad (20)$$

Donde:

P = presión barométrica

p_0 = presión atmosférica normal a nivel del mar

e = número irracional de Euler

m = masa de la molécula de aire seco

g = fuerza de gravedad

h = altura sobre el nivel del mar (m s. n. m.)

k = constante de Ludwig Boltzmann

T = temperatura

3.2.2 Densidad del fluido

De acuerdo a lo postulado por Peña Pérez y Becerra Santiago (2010) en concordancia con la aplicación de la ecuación que determina la densidad del aire, se necesita precisar tres parámetros, tales como la presión atmosférica, la humedad relativa y la temperatura del estado del aire. Esta formulación genera una incertidumbre relativa del $24 \cdot 10^{-5}$, es decir, su margen de precisión se acentúa en dicho valor en comparación con otras formulaciones más generales y complejas (p. 3).

$$\rho = \frac{0,34848 \cdot P - 0,009 \cdot h_r \cdot \exp(0,061 \cdot T)}{273,15 + T} \quad (21)$$

Donde:

ρ = densidad del fluido

P = presión atmosférica

h_r = humedad relativa del aire

\exp = función exponencial de la constante de Leonhard Euler

T = temperatura

Otra fórmula seleccionable que concede valores aproximados en cuanto al cálculo de la densidad del fluido, es la que se presenta a continuación (Ecuación (22)), aunque cabe destacar que, en comparación con la Ecuación (21), anteriormente referida, se tiene un margen de error del 0,0117% (Peña Pérez & Becerra Santiago, 2010, p. 3).

$$\rho = \frac{0,34848 \cdot P - h_r \cdot (0,00252 \cdot T - 0,020582)}{273,15 + T} \quad (22)$$

Por otro lado, Çengel y Cimbala (2006), también han realizado un postulado para determinar la densidad de un gas ideal (aire), en la que consideran relacionar las variables que forman una ecuación de estado (p. 38).

$$P = \rho \cdot R \cdot T \quad (23)$$

Donde:

ρ = densidad del gas

R = constante del gas

T = temperatura

3.2.3 Velocidad del sonido

Una fórmula simple y aproximada para hallar la velocidad del sonido, es la que se encuentra configurada de la siguiente manera (Frederiksen Scientific, 2017, p. 3):

$$v_s = 331,30 \frac{\text{m}}{\text{s}} + \left(0,606 \frac{\text{m/s}}{^\circ\text{C}} \cdot T \right) \quad (24)$$

Donde:

v_s = velocidad de propagación de las ondas sonoras

T = temperatura

En relación a la Ecuación (24), la velocidad del sonido a una temperatura de 0 grados Celsius, se fija en un valor de 331,30 m/s, mientras que, por cada incremento del grado de temperatura, se deberá sumar 0,606 m/s.

Otra formulación aplicable para obtener el valor de la velocidad sónica, es la que se muestra a continuación, donde se requiere definir ciertos datos termodinámicos del aire (Çengel & Cimbala, 2006, p. 616).

$$v_s = \sqrt{k \cdot R \cdot T} \quad (25)$$

Donde:

k = constante adiabática de gas ideal aire

R = constante universal de los gases

T = temperatura

3.2.4 Número de Mach

El número de Mach (Ma), hace referencia a la división entre la velocidad real de un fluido o la velocidad de desplazamiento de un objeto y la velocidad sónica que envuelve a aquel fluido, por lo que se obtiene la siguiente interpretación (White, 2003, p. 579):

$$\text{Ma} = \frac{v}{v_s} \quad (26)$$

Donde:

Ma = número de Ernst Mach

v = velocidad del flujo

v_s = velocidad sónica

En relación a lo señalado con Munson et al. (2002), el número de Mach es estudiado a profundidad en flujos de gases con grandes velocidades, es decir, en flujos que superan a los límites subsónicos (p. 25).

De acuerdo a los apuntes realizados por Martínez de la Calle (2009), es posible contar con dos tipos de diversificaciones de flujos en afinidad al número de Mach, sin embargo, a continuación en la Tabla 4, se muestra el tipo de diversificación más específica (p. 4).

Tabla 4

Clasificación completa de un flujo respecto a su número de Mach

Tipo de flujo	Equivalencia
Flujo incomprensible	$Ma < 1$
Flujo subsónico	$0,3 < Ma < 1$
Flujo transónico	$0,8 < Ma < 1,2$
Flujo supersónico	$1,2 < Ma < 3,0$
Flujo hipersónico	$3,0 < Ma$

Tomado de: (Martínez de la Calle, 2009, p. 14)

3.2.5 Ecuación de Continuidad

Mott y Untener (2015), manifiestan que, este enunciado matemático parte de la relación de tres variables primordiales, estas tienen que ver con la densidad del flujo, el área donde se enmarca la trayectoria del fluido y la velocidad del mismo en dos sectorizaciones con características diferentes que coexisten en un mismo sistema, por consiguiente se define la expresión matemática de la densidad del aire para cualquier condición que presente un fluido (p. 120):

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2 \quad (27)$$

Donde:

ρ_1 = densidad del flujo de la primera sección

A_1 = área de la primera sección

v_1 = velocidad del flujo de la primera sección

ρ_2 = densidad del flujo de la segunda sección

A_2 = área de la segunda sección

v_2 = velocidad del flujo de la segunda sección

Si un flujo es considerado como incomprensible (es decir, la densidad del aire cuenta con condiciones estables o este no varía drásticamente en un entorno, siendo $Ma \leq 0,3$), se podría efectuar una simplificación de parámetros respecto a la Ecuación (27), pudiéndose cancelar las

variables de densidad 1 (ρ_1) y la densidad 2 (ρ_2), obteniéndose como resultado la siguiente formulación (Mott & Untener, 2015, p. 120):

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad (28)$$

Mott (1996), hace referencia al caso en que si se requiere corroborar que la rapidez de flujo de masa (M) en un tiempo concreto, sea idéntica a la que fluye tanto en la sección 1 (M_1) como en la sección 2 (M_2), se ejecutaría la relación siguiente (p. 148):

$$\begin{aligned} M_1 &= M_2 \\ \text{Siendo } M_{1,2} &= \rho_{1,2} \cdot A_{1,2} \cdot v_{1,2} \end{aligned} \quad (29)$$

3.2.6 Ecuación de Bernoulli

Para el caso de los flujos incompresibles, cuya condición significa que la densidad del aire (ρ) permanece constante, la ecuación de Bernoulli se delimita en base a lo siguiente (White, 2003, p. 179):

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{1}{2} \cdot v_1^2 + g \cdot z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{1}{2} \cdot v_2^2 + g \cdot z_2 \quad (30)$$

Donde:

P_1 = presión estática del fluido en el punto 1

γ = peso específico del fluido

v_1 = velocidad en el punto 1

z_1 = carga de elevación en el punto 1

g = aceleración de la gravedad

P_2 = presión estática del fluido en el punto 2

v_2 = velocidad en el punto 2

z_2 = carga de elevación en el punto 2

La ecuación anterior, puede llegar a escribirse también de la siguiente manera (Munson et al., 2002, p. 322):

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + z_2 \quad (31)$$

En ocasiones el peso específico (γ) en el postulado de Bernoulli, es suplantado por el producto que se obtenga entre las variables de densidad y gravedad, es decir, $\gamma = \rho \cdot g$.

Çengel y Cimbala (2006) puntualizan que, comúnmente en los flujos de aire, los efectos por fuerza gravitacional son irrelevantes, de manera que, la ecuación de Bernoulli se interpreta como (p. 310):

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 \quad (32)$$

Donde:

P_1 = presión en la sección 1

ρ = densidad del aire

v_1 = velocidad del aire en la sección 1

P_2 = presión en la sección 2

v_2 = velocidad del aire en la sección 2

En conexión a la Ecuación (32), los autores Mott y Untener (2015) mencionan que puede representarse a la constante numérica ($1/2$), la presión (ρ) y a la velocidad (v), mediante el uso del siguiente término combinado (ver Ecuación (33)), que su vez es utilizado para habitualmente referirse a la presión dinámica (q) (p. 434):

$$q = \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (33)$$

3.2.7 Coeficiente de presión

A medida que el aire se moviliza desde la entrada hasta la salida del cono o boquilla de convergencia, conceptualmente la presión habrá decaído de manera continua, puesto a que, el coeficiente de presión que se sitúa en el área de salida de la cámara de estabilización y a inicio de la contracción, aproximadamente ronda el valor no dimensional de 1, y en el área de salida de la tobera convergente y al comienzo de la cámara de ensayos, el coeficiente de presión llega a ser 0. Si se cumple esta tendencia, es posible indicar que, el gradiente de presión resulta positivo, de modo que probablemente no sería apreciable algún tipo de inestabilidades en la capa límite (efectos indeseados). Por consiguiente, se fija la relación unidimensional del coeficiente de presión (Barlow et al., 1999, p. 96).

$$C_p = 1 - \left[\frac{A_{ts}}{A(x)} \right]^2 \quad (34)$$

Donde:

C_p = coeficiente de presión

A_{ts} = área principal de la sección de prueba (o área de salida de la contracción)

$A(x)$ = área total en función del par ordenado (áreas fraccionadas)

3.2.8 Número de Reynolds

De acuerdo con Mott y Untener (2015), el número adimensional de Reynolds, es un parámetro que ayuda a determinar el comportamiento de un fluido tipo newtoniano, sin tener que directamente observarlo, por tanto, la expresión matemática que permitirá predecir dicha condición en una tubería circular, se constituye como (p. 181):

$$\text{Re} = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu} \quad (35)$$

Donde:

v = velocidad del flujo

D = diámetro de la tubería

ρ = densidad del fluido

μ = viscosidad dinámica del fluido

Para secciones sin perfil circular, el número de Reynolds está basado precisamente en su diámetro hidráulico; esta última cualidad también es implementada en la determinación de la rugosidad relativa (ϵ_r) y del factor de fricción (f) en tubería no circulares, permitiendo que los cálculos del factor de fricción sean idénticos a los que se obtendría en una tubería redonda (Munson et al., 2002, p. 492). En tanto que, para las tuberías no circulares, el número de Reynolds, está dado por la siguiente expresión (Çengel & Cimbala, 2006, p. 324).

$$\text{Re} = \frac{v \cdot D_h \cdot \rho}{\mu} \quad (36)$$

Donde:

v = velocidad del aire

D_h = diámetro hidráulico del ducto

ρ = densidad del flujo

μ = viscosidad dinámica del flujo

Una clasificación específica del número de Reynolds, es la que se muestra a continuación.

Tabla 5*Intervalos para una caracterización específica del número de Reynolds*

Tratamiento de análisis	Descripción del flujo
$0 < Re < 1$	Movimiento laminar «lento» altamente viscoso.
$1 < Re < 100$	Laminar, fuerte dependencia del número de Reynolds.
$100 < Re < 10^3$	Laminar, es útil la teoría de capa límite.
$10^3 < Re < 10^4$	Transición a la turbulencia
$10^4 < Re < 10^6$	Turbulento, moderada dependencia del número de Reynolds.
$10^6 < Re < \Delta^a$	Turbulento, débil dependencia del número de Reynolds.

Nota. La expresión griega delta, señala una variación numérica constante del número de Reynolds. Tomado de: (White, 2003, p. 337)

3.2.9 Factor de fricción

El factor de fricción de fricción de Darcy – Weisbach, también llamado factor de fricción de Darcy, es un parámetro primordial para establecer la pérdida de presión de un segmento, y debe ser considerada en los flujos internos que se produzcan en las tuberías circulares y ductos no circulares (Çengel & Cimbala, 2006, p. 329). A continuación, se muestra las condiciones principales que contendrá el factor de fricción en función al tipo de fluido, en donde en los flujos laminares, el factor de fricción es independiente de la rugosidad relativa (ϵ/D), y el valor de f decrece con números de Reynolds que aumentan gradualmente.

Tabla 6*Factor de fricción de Darcy según el flujo*

Tipo de flujo	Condición
Flujo laminar	Dependencia netamente del número adimensional de Reynolds (Re).
Flujo turbulento	Dependencia del número adimensional de Reynolds y de la rugosidad relativa (ϵ_r).

Tomado de: (Çengel & Cimbala, 2006, pp. 340 - 342)

El factor de fricción tiene una menor incidencia en una tubería con paredes lisas, sin embargo, debido a la condición de no deslizamiento, el factor de fricción de este tipo de conducto no debe ser valorizado con cero (Çengel & Cimbala, 2006, p. 342).

De acuerdo a la conjunción de un determinado flujo con un régimen (laminar o turbulento), se presenta las dependencias de estas con las siguientes postulaciones (Mott & Untener, 2015, p. 195).

$$f = \frac{64}{Re} \Rightarrow \text{flujos laminares} \quad (37)$$

Donde:

f = factor de fricción

Re = número de Reynolds

En el caso de los regímenes turbulentos, se presentan tres variantes válidas para el cálculo del factor de Darcy, la Ecuación (38) fue desarrollada por los investigadores P. K. Swamee y A. K. Jain, y permite el procesamiento directo del factor de fricción (Mott & Untener, 2015, p. 195).

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 \cdot (D/\varepsilon)} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \Rightarrow \text{flujos turbulentos} \quad (38)$$

Donde:

f = factor de fricción de Darcy

D = diámetro del ducto tubular

ε = rugosidad absoluta

La siguiente expresión explícita fue proporcionada por S. E. Haaland, y es señalada como un método preciso para hallar el factor de fricción (Çengel & Cimbala, 2006, p. 341).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \cong -1,8 \cdot \log \cdot \left[\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} \right)^{1,11} \right] \Rightarrow \text{flujos turbulentos} \quad (39)$$

La formulación siguiente representa la ecuación ampliamente conocida que ha sido realizada por Colebrook – White, y se caracteriza por la realización de reiteradas iteraciones para calcular el factor de fricción, mediante la implementación del método iterativo de Newton – Raphson o también referido como método de Newton – Fourier (Çengel & Cimbala, 2006, p. 341).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f'}} \right) \Rightarrow \text{flujos turbulentos} \quad (40)$$

Donde:

f = factor de fricción encontrado

ε = rugosidad absoluta del material

D = diámetro de la tubería circular (diámetro hidráulico en ductos no circulares)

Re = número adimensional de Reynolds

f' = factor de fricción asumido mediante el Diagrama de Moody

3.2.10 Pérdidas en un sistema

Según la literatura de Munson et al. (2002), la determinación real de los coeficientes de resistencia (K_L), está ligada a ciertas características propias que exhibe un ducto, también podría depender de las propiedades que contenga un fluido (p. 481).

En un sistema compuesto por conductos o tuberías que generalmente presenten geometrías variadas, tales como contracciones, ensanchamientos, codos, entre otros, darán indicio a que el flujo que se desplaza por aquel circuito, puede ser propenso a sufrir pérdidas por fricción, ya que por las características del ducto antes señaladas, provocan que el fluido se va interrumpido de trascender suavemente (Çengel & Cimbala, 2006, pp. 347 - 348).

$$h_{L_{\text{mayor}}} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \Rightarrow \text{pérdidas mayores} \quad (41)$$

Donde:

$h_{L_{\text{mayor}}}$ = pérdida de carga mayor

f = factor de fricción

L = longitud del conducto

v = velocidad del fluido

g = fuerza gravitacional

$$h_{L_{\text{menor}}} = K_L \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \Rightarrow \text{pérdidas menores} \quad (42)$$

Donde:

K_L = coeficiente de pérdida o de resistencia

v = velocidad del flujo

g = fuerza de atracción gravitatoria

La sumatoria de los tipos de pérdidas (mayor y menor), dan como resultado la pérdida de carga total en un sistema, sin embargo, a continuación se menciona la expresión general para determinar las pérdidas globales de una sección, la misma que relaciona a la Ecuación (41) y a la Ecuación (42) (Çengel & Cimbala, 2006, p. 349).

$$h_{L_{\text{total}}} = \left(f \cdot \frac{L}{D} + K_L \right) \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \Rightarrow \text{pérdidas totales} \quad (43)$$

3.2.11 Flujo másico

En base a lo señalado por White (2003), la fórmula para hallar en términos sencillo el gasto másico a través de una superficie, equivale a la siguiente aproximación unidimensional (pp. 132 - 133):

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v \quad (44)$$

Donde:

\dot{m} = caudal másico

ρ = densidad del aire

A = área de la sección

v = velocidad del aire

3.2.12 Caudal volumétrico

Los escritores Çengel y Cimbala (2006) ponen en contexto que, el espacio tridimensional o el volumen de un fluido que se desplaza por medio de una sección transversal en función a la magnitud física del tiempo, se considera un caudal volumétrico, y por tanto se determina como (p. 174):

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (45)$$

Donde:

\dot{V} = razón de flujo volumétrico

\dot{m} = razón del flujo de masa

ρ = densidad del aire

3.2.13 Potencia requerida

La potencia imprescindible para mover el fluido de un circuito, viene dada por la siguiente expresión (White, 2003, p. 729).

$$P = \rho \cdot g \cdot \dot{V} \cdot H \quad (46)$$

Donde:

P = potencia necesaria

g = fuerza de atracción gravitacional

\dot{V} = gasto volumétrico

H = carga o pérdidas

CAPÍTULO IV. NORMATIVAS DE APLICACIÓN

4.1 Normativas para el diseño

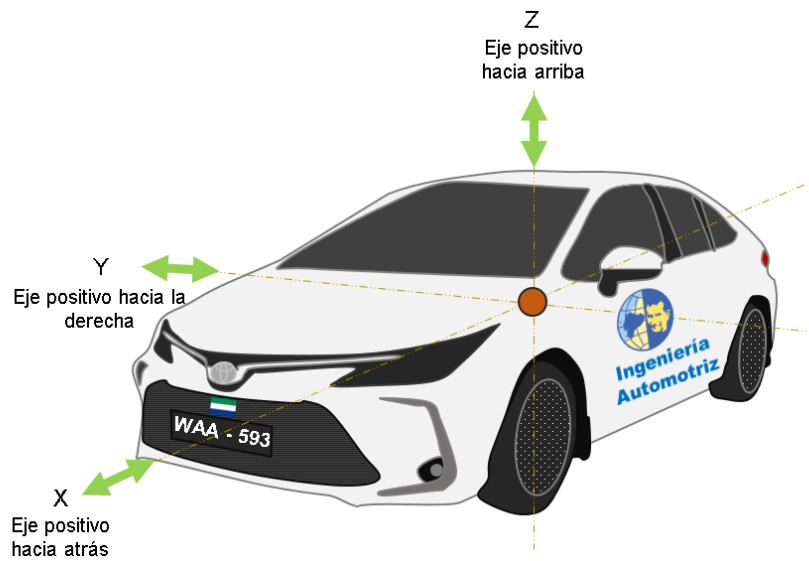
4.1.1 SAE J1594

Orientación

La Figura 5 presenta tres ejes (x, y, z) que crean un sistema ortogonal en el vehículo.

Figura 5

Sistema de ejes cartesianos



Ángulo del automóvil

Por medio de la Tabla 7, se muestra los ángulos vehiculares en base a la normativa SAE J1594.

Tabla 7

Ángulos del automóvil

Término		Simbología	Descripción
Inglés	Español		
Pitch	Cabeceo	α	Ángulo dado entre el eje longitudinal de la carrocería vehicular o dirección de x y la superficie del suelo. Morro positivo hacia la parte superior.
Yaw	Guiñada	ψ	Ángulo dado entre el eje x y el vector de velocidad representado por \vec{V}_∞ . Morro positivo hacia a la derecha.
Roll	Alabeo	ϕ	Ángulo dado entre el eje lateral de la carrocería o dirección de y, y la superficie del suelo. Sección lateral positiva hacia la parte inferior del plano.

Nota. Tomado de: (SAE International, 2010, p. 4)

Parámetros del vehículo

Los parámetros del vehículo son expresados en la siguiente Tabla 8, la cual describe los términos en inglés, raíz del lenguaje principal.

Tabla 8

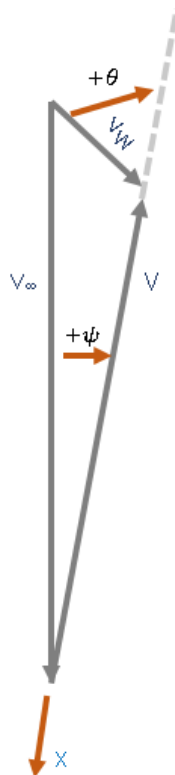
Parámetros del vehículo

Símbolo	Término		Descripción
	Inglés	Español	
WB	Wheelbase	Distancia entre ejes	Distancia, en dirección del plano x, marcada entre el eje frontal y posterior.
A	Frontal Area	Área frontal	Perspectiva del área del automóvil en dirección del plano x.
σ	Scale Factor	Factor de escala	Cociente dimensional del modelo vehicular a escala real.
\vec{V}	Vehicle Velocity	Velocidad del auto	Vector de velocidad en relación al vehículo con magnitud en dirección al plano x.

Nota. Tomado de: (SAE International, 2010, p. 4)

Figura 6

Velocidad del flujo libre



Nota. Tomado de: (SAE International, 2010, p. 7)

Parámetros de flujo

Los indicadores del fluido son expresados en la Tabla 9.

Tabla 9

Parámetros de flujo

Símbolo	Término		Descripción
	Inglés	Español	
\vec{V}_w	Wind velocity	Velocidad del viento	Vector de velocidad del viento, ubicado en el plano x-y, con magnitud V_w en dirección θ con relatividad al eje x.
θ	Wind Angle	Ángulo del viento	Ángulo del vector de velocidad del viento relativo al eje x. Este tomará un valor positivo cuando el fluido muestre aproximación desde la izquierda.
V_∞	Free-stream speed	Velocidad de flujo libre	Magnitud del vector velocidad del viento en correspondencia con el vector velocidad del automóvil. Su expresión matemática es: $V_\infty = \vec{V}_w - \vec{V} $
q_∞	Dynamic pressure	Presión dinámica	Presión provocada por la velocidad del fluido. Estado dado por la ecuación de: $q_\infty = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2$
ρ	Air density	Densidad del aire	La condición estándar para la densidad del aire esta dado por: $\rho = 1,2250 \text{ kg/m}^3$
μ	Air viscosity	Viscosidad del aire	La condición estándar para la viscosidad del aire viene representada por: $\mu = 1,7894 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$
δ	Boundary layer thickness	Espesor de la capa límite	Altura sobre la superficie donde la velocidad interna, $u(z)$, corresponde al 99% de la velocidad del flujo libre.
δ^*	Displacement thickness	Espesor de desplazamiento	Distancia mensurada de forma perpendicular al límite del objeto donde la corriente libre es movilizada por el origen de la capa límite. Su expresión matemática es: $\delta^* = \int_0^\infty (1 - u(z)/V_\infty) \cdot dz$
p	Local static pressure	Presión local estática	Cuantía de presión suministrada a un fluido inmóvil.
P_∞	Free-stream static pressure	Presión estática del flujo libre	Espacio de la presión estática posicionada enfrente del fluido que está libre de cualquier incidencia externa. Interpreta la variación de la presión estática en la periferia del objeto. Delimita la atipicidad de presión adimensional sobre la presión dinámica en la corriente libre. $C_p = \frac{p - P_\infty}{q_\infty}$
C_p	Pressure coefficient	Coefficiente de presión	Para flujos incompresibles la ecuación es: $C_p = 1 - \left(\frac{V}{V_\infty}\right)^2$ El coeficiente de presión para un punto de estancamiento será siempre 1,0 para un flujo incompresible, en cambio este valor aumenta si el fluido es compresible. Cuando en un territorio de flujo la velocidad del flujo libre es mayor a la velocidad local, el coeficiente de presión toma un valor negativo, provocando que la presión local sea inferior a la presión de flujo libre. Relación entre las fuerzas de inercia, que impulsa al fluido, y viscosa o de fricción que la repelan. $Re = \rho \cdot V_\infty \cdot \frac{WB}{\mu}$
Re	Reynolds number	Número de Reynolds	El número de Reynolds categoriza si un flujo es laminar o turbulento, siendo así que la viscosidad toma protagonismo para gobernar la velocidad de flujo. En la séptima edición de la normativa API 13D, distingue a los dos flujos mencionados en el párrafo anterior, de la siguiente forma. $Re \leq 2100 \rightarrow \text{laminar}$ $Re \geq 2100 \rightarrow \text{turbulento}$
Re/ℓ	Reynolds number per unit length	Números de Reynolds por unidad de longitud	Por unidad de longitud, el número de Reynolds es expresado por medio de: $\frac{Re}{\ell} = \frac{\rho \cdot V_\infty}{\mu}$
V_{EQ}	Equivalent velocity	Velocidad equivalente	La expresión de la velocidad equivalente viene dado por la velocidad de flujo selectivo multiplicado al factor de escala. $V_{EQ} = V_\infty \cdot \sigma$
-	Standard conditions	Condición estándar	La norma SAE J1594 determina que la condición estándar en aire seco tendrá una temperatura de 15°C y presión de 101,325 kPa.

Nota. La presión dinámica aptada a un túnel de viento deberá ser graduada sin inducción del fluido, es decir, en un túnel vacío.

Tomado de: (SAE International, 2010, pp. 4 - 5)

La variable de viscosidad puede hallarse por medio de la siguiente expresión, dando el resultado en kg/m^3 .

$$\rho = 1,2250 \cdot \left(\frac{228,15}{(273,15 + T)} \right) \left(\frac{p}{101,325} \right) \quad (47)$$

En entornos donde la humedad relativa es alta, la densidad del aire es tomado en consideración para el cálculo en base a la temperatura, presión y humedad relativa. En cuanto, para localizar la densidad del aire en condición no estándar, puede emplearse la siguiente ecuación. El producto final estará dado en unidad de $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$.

$$\mu = (1,7203 + 0,00460 \cdot T) \times 10^{-5} \text{ (para } T = 0^\circ \text{ a } 60^\circ \text{ C)} \quad (48)$$

Donde:

T = temperatura del aire en grados Celcius

p = presión atmosférica en kiloPascales

Los momentos y fuerzas aerodinámicas son establecidos en la Tabla 10.

Tabla 10

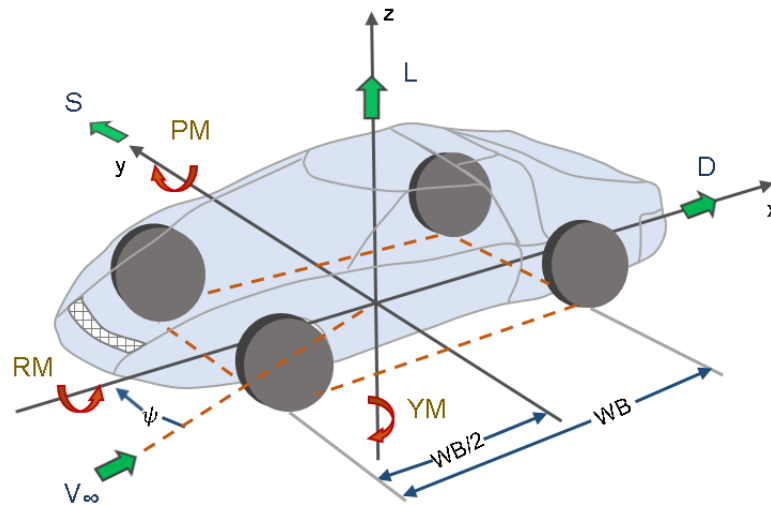
Momentos y fuerzas

Símbolo	Término		Fórmula	Descripción
	Inglés	Español		
D	Drag	Arrastre	$F_x = D$	Fuerza aerodinámica que interviene en el eje x positivo hacia la parte posterior.
L	Lift	Sustentación	$F_z = L$	Fuerza aerodinámica que interviene en el eje z, positivo hacia la parte superior.
S	Side force	Fuerza lateral	$F_y = S$	Fuerza aerodinámica que interviene en el eje y, positivo el lado derecho.
PM	Pitching moment	Momento de cabeceo	$M_y = PM$	Momento aerodinámico que actúa sobre el eje y, morro hacia arriba positivo.
YM	Yawing moment	Momento de guiñada	$M_z = -YM$	Momento aerodinámico que actúa sobre el eje z, morro hacia derecho positivo.
RM	Rolling moment	Momento de alabeo	$M_x = -RM$	Momento aerodinámico que actúa sobre el eje x, lado derecho positivo hacia abajo.
LF	Front lift	Sustentación frontal	$LF = \frac{L}{2} + \frac{PM}{WB}$	Componente de sustentación aerodinámico que influye en el eje delantero.
LR	Rear lift	Sustentación trasera	$LR = \frac{L}{2} - \frac{PM}{WB}$	Componente de sustentación aerodinámico que influye en el eje posterior.
SF	Front side force	Fuerza lateral frontal	$SF = \frac{S}{2} + \frac{YM}{WB}$	Componente de la fuerza lateral que interfiere en el eje delantero.
SF	Rear side force	Fuerza lateral trasera	$SF = \frac{S}{2} - \frac{YM}{WB}$	Componente de la fuerza lateral que interfiere en el eje posterior.

Nota. Las fuerzas y momentos presentadas, están categorizadas de acuerdo al plano tridimensional vistas en Figura 7. Tomado de: (SAE International, 2010, p. 5)

Figura 7

Sistema de coordenadas y convenciones



Nota. Tomado de: (SAE International, 2010, p. 7)

Coeficientes de fuerzas y momentos

Los coeficientes aerodinámicos de carácter no adimensional son señalados con la letra C, el subíndice, que acompaña a este consonante, representa el momento o fuerza de acuerdo al caso.

Tabla 11

Coeficientes de fuerzas y momentos

Símbolo	Término		Ecuación
	Inglés	Español	
C_D	Drag coefficient	Coefficiente de arrastre	$C_D = \frac{D}{q_\infty \cdot A}$
C_L	Lift coefficient	Coefficiente de sustentación	$C_L = \frac{L}{q_\infty \cdot A}$
C_s	Side force coefficient	Coefficiente de fuerza lateral	$C_s = \frac{S}{q_\infty \cdot A}$
C_{PM}	Pitching moment	Coefficiente de momento de cabeceo	$C_{PM} = \frac{YM}{q_\infty \cdot A \cdot WB}$
C_{YM}	Yawing moment coefficient	Coefficiente de momento de guiñada	$C_{YM} = \frac{YM}{q_\infty \cdot A \cdot WB}$
C_{RM}	Rolling moment coefficient	Coefficiente de momento de alabeo	$C_{RM} = \frac{RM}{q_\infty \cdot A \cdot WB}$
C_{LF}	Front lift coefficient	Coefficiente de sustentación frontal	$C_{LF} = \frac{C_L}{2 + C_{PM}}$
C_{LR}	Rear lift coefficient	Coefficiente de sustentación trasera	$C_{LR} = \frac{C_L}{2 - C_{PM}}$
C_{SF}	Front side force coefficient	Coefficiente de fuerza lateral frontal	$C_{SF} = \frac{C_s}{2 - C_{YM}}$
C_{SR}	Rear side force coefficient	Coefficiente de fuerza lateral trasera	$C_{SR} = \frac{C_s}{2 - C_{YM}}$

Nota. Los coeficientes de momento para automóviles mayores a dos ejes, pueden guiarse mediante referencias de longitud

Tomado de: (SAE International, 2010, p. 6)

Coeficiente de arrastre ponderado de guiñada

El coeficiente de ponderación de guiñada está representado por C_p , señala la fuerza de arrastre aerodinámico promedio en el transcurso del ingreso del flujo y es equilibrado al aplicarse la velocidad del vehículo en sustitución a la corriente libre (SAE International, 2010, p. 6).

$$\overline{C_D} = \frac{\overline{D}(C_D, V, V_W, \psi, \theta)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A} \quad (49)$$

Para precisar una cantidad o magnitud, deberán regirse, de acuerdo a la norma SAE International J1594, por medio del Sistema Internacional de Unidades (SI).

4.1.2 SAE J2071

Un túnel de viento de garganta o chorro abierto, dentro de las aplicaciones automotrices, es un componente de estudio en el cual la sección de ensayos (lugar donde será colocado el objeto a ser analizado) se encuentra accesible en tres cuartas partes y la carretera es simulada mediante un piso equilibrado. De acuerdo a varias publicaciones realizadas por la SAE International, los túneles de viento de boquilla abierta sujetan las siguientes ventajas.

- a. Menor corrección de bloqueo en contraste con las secciones de circuito cerrado.
- b. Mayor accesibilidad a la sección de ensayo (cámara de prueba).

4.1.2.1 Condición del flujo

El control de datos en la calidad del flujo en un túnel de circuito abierto, a través de la base de datos que ofrece el comité de miembros de investigación de la SAE International, describe en la Tabla 12, los valores que deberán alcanzarse durante las pruebas desempeñadas en túneles para el análisis vehicular, en tanto la Tabla 13, determina las propiedades de linaje del fluido (SAE International, 1994, p. 5).

Tabla 12

Calidad de flujo para secciones de prueba de garganta abierta

Propiedad	Representación		Valor mínimo requerido
	Simbología	Unidad	
Angularidad de cabeceo	$\Delta\alpha$	(grado)	$\leq \pm 0.5$
Angularidad en guiñada	$\Delta\beta$	(grado)	$\leq \pm 0.5$
Uniformidad de velocidad de flujo	Δv	(%)	$\leq \pm 1.0$
Turbulencia intensidad	Tux	(%)	≤ 0.5
Nivel de presión de variación	Δc_p	(-)	< 0.01
Longitud de nivel de presión	$\Delta l/L$	(-)	$\geq 1.0 (\geq 1.5)^{(1)}$
Desplazamiento de espesor	δ^*	(mm)	10% de la distancia al suelo

Nota. Tomado de: (SAE International, 1994, p. 5)

Tabla 13

Descripción de las propiedades que evalúan la calidad de flujo

Propiedades	Definición
Volumen de prueba de control estándar	<p>La calidad del flujo está determinada por el volumen de prueba del cubículo de control (aplicado en túneles de escala nativa). El tamaño del volumen esta evaluado por:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Largo = 100% de longitud típica del vehículo. • Altura = 100% de la altura típica del vehículo. • Ancho = 100% del ancho típico del vehículo para una condición de no guiñada.
Angularidad en la dirección del flujo	<p>La angularidad de dirección está dividida en dos partes:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Angularidad de paso ($\Delta\alpha$).- corresponde a la desviación máxima permisible del ángulo de paso del flujo dentro de un volumen de control. Se establece el término ángulo a la diferencia entre la dirección del flujo y eje x del plano de superficie x-y. 2. Angularidad de guiñada ($\Delta\beta$).- precisa la desviación máxima permisible del ángulo de guiñada del flujo en un volumen de mando. El ángulo es interpretado como la vía que toma el flujo y el eje de las abscisas dentro de un plano vertical x-z.
Uniformidad de la velocidad del flujo	<p>La homogeneidad de la velocidad del flujo está dada por la ecuación:</p> $\Delta V = (V - V_{\infty})/V_{\infty}$ <p>ΔV → desviación máxima permitida en función de la velocidad del flujo, salvo en la capa límite V_{∞} → magnitud total del vector de flujo del aire relativo</p> <p>El resultado final al resolver la ecuación será en cantidad de porcentaje.</p>
Intensidad de turbulencia	<p>Induce a la intensidad máxima de turbulencia admisible en la dirección de la corriente en un volumen de mando. Esta propiedad viene representada por Tu_x.</p> <p>En la condición de presión aparecen dos divisiones las cuales son:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Desviación de presión estática.- al desviación máxima permisible viene dado por: $\Delta C_p = (p - \bar{p}_{\infty})/q_{\infty}$ p_{∞} → valor medio de región tomado desde el frontal del vehículo hacia el plano base
Condición de presión constante	<ol style="list-style-type: none"> 2. Longitud de presión constante.- expresada por medio de la fórmula siguiente: $\Delta l/L$ Δl → presión constante en la sección de prueba Δl → longitud del automóvil <p>La constante traduce que el desvío de presión es inferior o uniforme a Δc_p.</p>
Espesor de deslizamiento	<p>El espesor de deslizamiento está representado por el termino de:</p> $\delta^* = \int_{\infty}^{\infty} (1 - V/V_{\infty}) dy$

Nota. Tomado de: (SAE International, 1994, pp. 7 - 8)

De acuerdo al desarrollo investigativo fomentado por C. N. H. Lock (1929), se planteó la siguiente ecuación de diferencia de velocidad, en el cual valora dicha diversificación para la zona de prueba del túnel.

$$\Delta V/V_{\infty} = \tau\lambda(A/A_N)^{3/2} \quad (50)$$

Donde:

ΔV = divergencia de velocidad provocado por la obstrucción

t = coeficiente de bloqueo específico de frontera de la sección de prueba

λ = coeficiente específico de modelo

A= área transversal máxima del modelo

A_N = sección transversal del túnel de viento

$$D_m/D_\infty = (1 + (\Delta V/V_\infty))^{2-1+2(\Delta V/V_\infty)} \quad (51)$$

Donde:

D_m = arrastre medio

D_∞ = arrastre del flujo infinito

En los resultados experimentales realizados por Schulz-Hausmann y Vagt (1987), sugieren que, para proporciones de bloqueo mayores, entre el 5 % y 10 %, se debe aumentar la duración del nivel de presión constante.

4.1.2.2 Dimensiones de túneles de viento

La Tabla 14 y la Tabla 15, muestran los parámetros geométricos de secciones en túneles de viento de chorro abierto que forman parte de marcas populares de automóviles y de centros de observación dedicados al análisis aerodinámico en objetos vehiculares a tamaño real y escala.

Tabla 14

Geometría de túneles de viento para estudio a tamaño real

Partes	Unidad	BMW AE	BMW AC	DB	FIAT	FORD	PININF.	PORSCHE	VW	IVK
Área de salida de la boquilla	m ²	20.02	10.0	32.64	30.0	23.75	11.75	22.3	37.5	22.45
Ancho de la boquilla	m	5.77	4.0	7.4	7.0	6.0	5.0	6.2	7.5	5.8
Altura de la boquilla	m	3.47	2.828	4.9	4.6	4.0	2.9	3.6	5.0	3.87
Contracción de la boquilla	-	3.66	3.0	3.6	4.0	4.0	6.5	6.06	4.0	4.411
Relación										
Longitud de la sección de prueba	m	10.02	9.83	10.0	10.5	10.5	8.0	13.5	10.0	9.5
Sur de TS. Atado.	m	10.34	13.74	14.8	12.2	15.0	9.6	12.7	17.0	15.0
Sur de TS. Atado.	m	5.30	5.72	7.5	10.8	8.5	4.2	6.85	13.0	8.5
Altura	m									
Modelo. Árbitro.										
Punto	-	0.471	0.356	0.5	0.55	0.39	0.46	0.41	0.43	0.474
x/L (TS)										
Sección transversal del colector	m ²	22.12	22.64	47.4	40.5	29.73	17.33	42.2	44.8	26.5
Ancho del colector	m	6.01	5.66	8.5	7.8	6.68	6.2	6.7	8.0	6.354
Altura del colector	m	3.68	4.0	6.5	5.6	4.45	3.5	4.85	5.6	4.166
Velocidad máxima	m/s	50	70	70	56	51	54	64	50	75

Nota. Tomado de: (SAE International, 1994, p. 6).

Tabla 15*Geometría de túneles de viento a escala por reducción*

Partes	Unidad	Aachen	Aachen	DB	DLR	DLR	DLR	FIAT	FORD	IVK	PORSCHE	VOVLO	VW
Área de salida de boquilla	m ²	1.0	2.69	1.64	8.61	8.1	1.53	4.0	8.64	1.654	1.4	4.125	6.0
Ancho de la boquilla	m	1.1	2.0	1.5	3.25	3.0	1.3	-	3.65	1.575	1.55	2.4	3.0
Altura de la boquilla	m	1.1	1.4	1.096	2.65	2.7	1.18	1.7	2.44	1.05	0.9	1.73	2.0
Relación de boquilla de contracción	-	3.3	2.57	6.0	5.6	5.44	4.91	7.0	11.0	4.988	6.06	6.25	6.0
Longitud de la sección de prueba	m	1.83	4.0	2.8	6.0	6.0	2.48	4.0	6.1	2.578	3.38	8.82	6.0
Sur de TS. Atado.	m	8.65	5.74	5.15	16.4	8.0	4.8	5.7	15.0	6.85	3.42	6.06	6.5
Ancho Sur de TS. Atado.	m	4.0	2.85	2.35	9.5	5.9	5.2	6.4	8.5	3.39	1.84	4.0	4.0
Altura Modelo. Árbitro.	-	0,55	0.38	0,46	0.43	0.48	0.5	0.4	0.41	0.474	0.41	0.283	0.42
Punto x/L (TS)	-	0,55	0.38	0,46	0.43	0.48	0.5	0.4	0.41	0.474	0.41	0.283	0.42
Cruz de coleccionista Sección	m ²	1.45	4.2	2.3	10.26	17.0	1.84	7.6	11.33	1.921	2.66	12.25	6.9
Ancho del colector	m	1.32	2.4	1.85	3.67	5.15	1.5	3.3	4.12	1.712	2.18	3.5	3.0
Altura del colector	m	1.32	1.7	1.3	2.8	3.3	1.28	2.3	2.75	1.122	1.22	3.5	2.3
Velocidad máxima	milisegundo	42	38	65	75	65	55	70	84	80	64	53	50

Nota. Tomado de: (SAE International, 1994, p. 7)

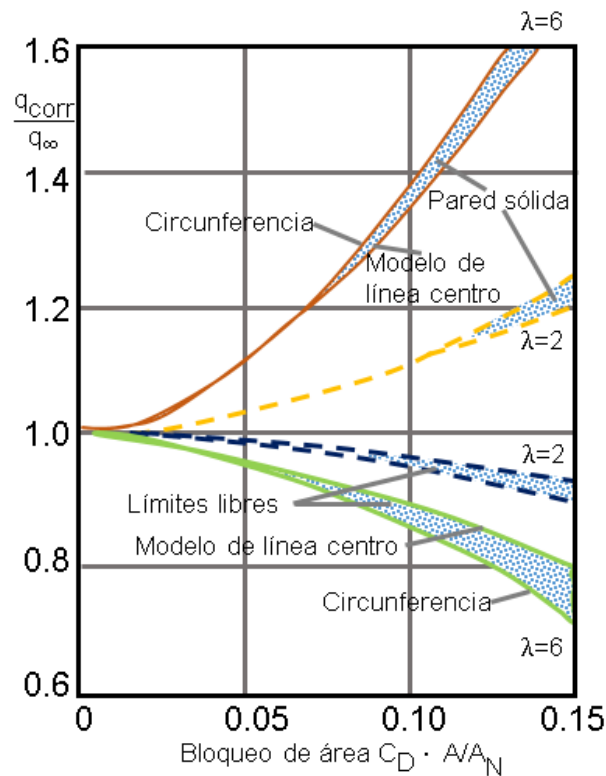
4.1.2.3 Presión dinámica

La manifestación de la presión dinámica del factor de corrección frente al bloqueo en una sección de prueba cerrada rectangular, es visible en la Figura 8, en el cual aparece también la sección de prueba abierta cuya relación de aspecto es $H_T/B_T=0,7$.

Para las relaciones de bloqueo $A/A_N > 0,05$, el residuo dado entre la circunferencia del modelo y la línea central, son más ostensibles.

Figura 8

Corrección de presión dinámica



Nota. Presión dinámica delimitada en el área de bloqueo para secciones de pruebas de género abierto y cerrado. Tomado de: (SAE International, 1994, p. 13)

Los factores que intervienen en el túnel con respecto al flujo que impacta en el modelo de investigación, son presentados en la Tabla 16.

Tabla 16

Parámetros que influyen en el túnel de viento

No.	Parámetros
1	Forma de la sección transversal / relación de aspecto, y localización del punto referencial en base al modelo ubicado en la excentricidad del habitáculo de estudio
2	Forma del modelo el tratamiento investigativo
3	Amplitud del modelo en ubicaciones asimétricas
4	Distancia del modelo, boquilla de entrada y colector

Nota. Los cuatro factores inducen en corredoras de flujo tanto para análisis de vehículos a tamaño comercial y escala por reducción. Tomado de: (SAE International, 1994, p. 13)

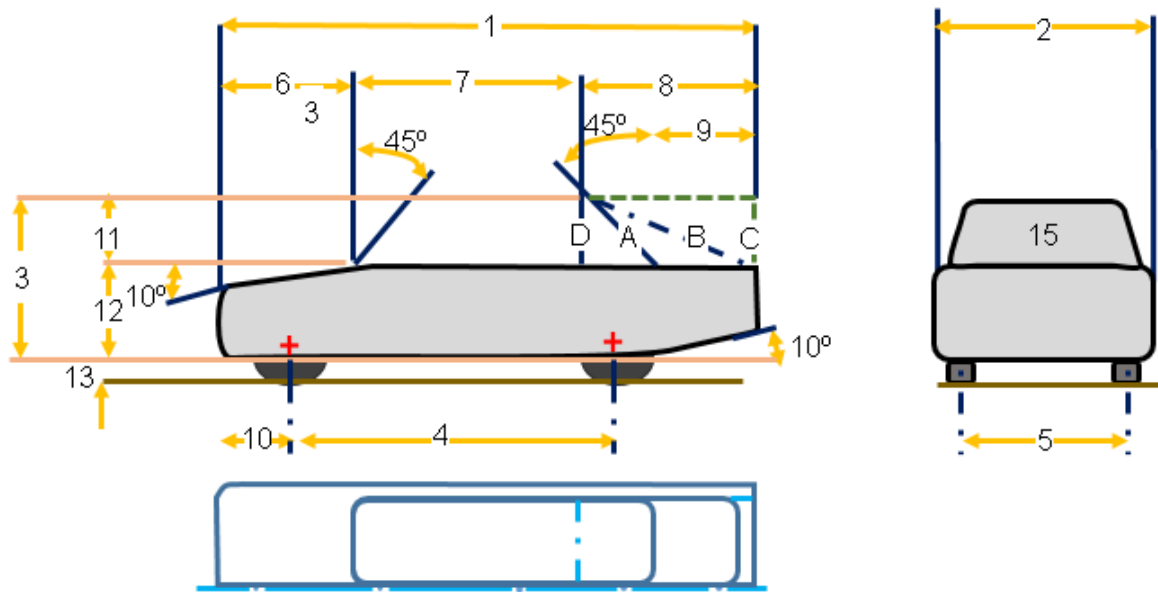
Nombramiento sectorizado para modelo vehicular

Acorde con el sustento investigativo expuesto por la SAE Internacional, es fiable utilizar modelos de resolución formidable para el desarrollo de la observación aerodinámica, siendo así que la escala por reducción aplicada en la zona de estudio están entre la relación 1:0.8 hasta 1:5.

Las dimensiones de los patrones de vehículos suelen disponer los siguientes valores referenciales (Tabla 17) que permutarán de acuerdo a su escala, previo a esto, en la Figura 9 se identifica, por medio de la numeración respectiva, las partes dimensionales de un modelo generalizado, donde los bordes de la carrocería presentan el mismo radio, sin embargo, hay excepción en bordes traseros de geometría cuadrada y la forma C.

Figura 9

Numeración e identificación de medidas para modelos de investigación



Nota. Tomado de: (SAE International, 1994, p. 45)

Tabla 17*Mediciones referenciales de modelos*

No.	Demarcación	Escala						
		1:5	1:4	1:3	1:2	1:2	1:1	1:0.8
1	Longitud total	833	1041	1359	2082	2945	4165	5206
2	Ancho promedio	325	407	542	812	1149	1625	2031
3	Altura total	284	356	474	710	1005	1420	1775
4	Distancia entre ejes	508	635	847	1270	1796	2540	3175
5	Pista, delantera y trasera	254	318	423	635	898	1270	1588
6	Longitud del capó	211	264	351	527	746	1055	1319
7	Longitud de la capota delantera	358	447	597	895	1266	1790	2238
8	Longitud del extremo trasero	264	330	440	660	933	1320	1650
9	Longitud de la cajuela	150	187	250	375	530	750	938
10	Voladizo delantero	107	134	178	267	378	535	669
11	Altura del dosel	102	127	169	254	359	508	635
12	Altura de la parte inferior del cuerpo	142	177	237	354	501	708	885
13	Espacio del suelo	41	51	68	102	145	205	256
14	Radio de bordes redondeados	30	38	51	76	107	152	190
15	Área frontal (m ²)	0.0074	0.116	0.206	0.464	0.928	1.856	2.900

Nota. Las medidas exhibidas en la tabla, se encuentra en unidad de milímetro, y sus valores varían en función de la escala aplicada al objeto. Tomado de: (SAE International, 1994, p. 45)

4.1.3 SAE J2084

Dimensiones de túneles de viento a gran escala

Al igual que en la Tabla 14, se especificó la geometría de los túneles de viento para ensayos de automóviles de escala real (1:1) según los datos suministrados por la normativa SAE J2071; en esta sección se expone por medio de la Tabla 18, el dimensionamiento para aquel tipo de túnel, sin embargo, la información está actualizada con última revisión al año 2016. Cabe señalar que los datos están disponibles únicamente para túneles que albergan vehículos de tamaño nativo donde el área de su sección transversal de la cámara de prueba varía entre 10 y 90 m².

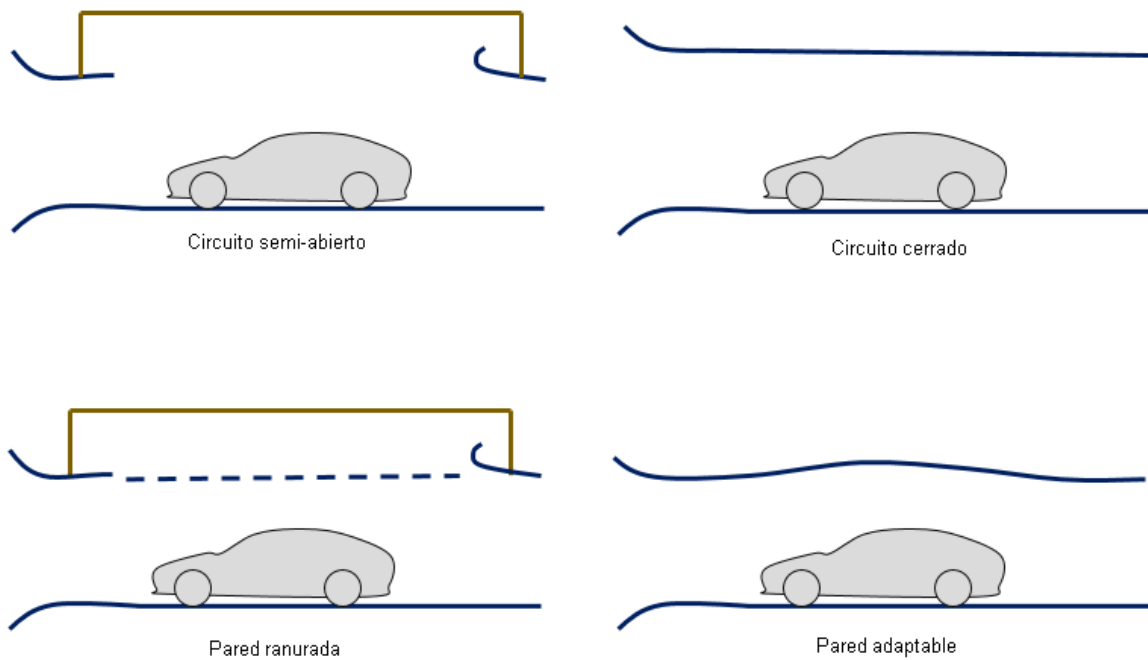
Tabla 18*Dimensiones y potencia de los túneles de gran escala 1:1*

Marcas y centros de investigación	Sección transversal de la boquilla AT (m ²)	Longitud de la sección de prueba LM (m)	Velocidad máxima del viento V _{máx} (Km/h)	Tipo de sección de prueba TS	Relación de contracción K	Potencia del ventilador P (kW)
BMW	20.0	12.50	160	Abierto (o)	3.66	1676
BMW	10.0	9.63	250	Abierto (o)	3.00	
Daimier-Benz	32.6	10.00	270	Abierto (o)	3.53	4000
	90.25	20.00	220	Cerrado (c)	4.80	12700
DNW	48.0	20.00	400	Cerrado (c)	9.00	12700
	36.0	16.00	540	Cerrado (c)	12.00	12700
Fiat	30.0	10.50	200	Abierto (o)	4.00	1865
FKFS	22.5	9.50	220	Abierto (o)	4.41	2500
Ford (Cologne)	24.0/8.6	10.30	182/298	Abierto (o)	4.80	1650/1960
General Motors	56.3	21.3	250	Cerrado (c)	5.00	2984
St. Cyr (S4)	15.0	10.00	144	Pared ranurada (sw)	5.00	516
St. Cyr (S10)	15.0	10.00	205	Pared ranurada (sw)	7.70	1000
JARI	12.0	10.00	205	Cerrado (c)	4.06	1200
Lockheed-Georgia	35.1	13.10	406	Cerrado (c)	7.02	6700
Mazda	24.0	12.00	230	Cerrado (c)	6.00	1600
MIRA	34.9	15.24	133	Cerrado (c)	1.45	970
Mitsubishi	24.0	12.00	216	Cerrado (c)		2350
NAMI	27.0	18.00	180	Pared ranurada (sw)	5.85	1500
Nippon Soken	17.5/12.0	12.5/8.5	120/200	Abierto (o)	3.66	1450
Nissan	28.5/15.0	12.00	190/270	Abierto (o)	6.43/12.0	2200
NRC	81.9	22.90	200	Cerrado (c)	6.00	6700
Pininfarina	11.7	8.00	185	Abierto (o)	6.50	1060
Porsche	22.3	12.00	230	Pared ranurada (sw)	6.06	2200
Toyota	17.5	8.00	200	Cerrado (c)	3.66	1500
Volkswagen	37.5	10.00	180	Abierto (o)	4.00	2600
Volvo	27.1	15.80	200	Pared ranurada (sw)	6.00	2300

Nota. Tomado de: (SAE International, 2016, p. 8)

4.1.3.2 Tipos de sección de prueba

Las secciones de prueba para un corredor de aire pueden ser fabricadas de diversos tipos, para ello en la Figura 10, se muestra cuatro clases existentes según la SAE J2084, que son utilizadas de acuerdo a la objetividad del estudio.

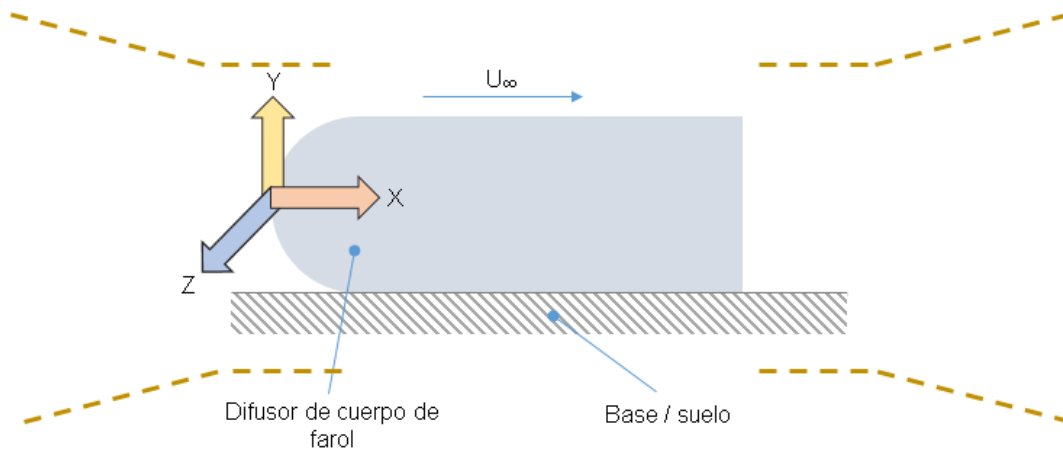
Figura 10*Tipos de sección de pruebas*

Nota. Tomado de: (SAE International, 2016, p. 7)

La sección de circuito cerrado está demarcada por paredes sólidas también consideradas semi-abierta y dispone de un piso que atribuye a la calzada, su aplicación es muy frecuente, sin embargo, la alternativa actual induce al manejo de la sección por pared ventilada o ranurada, donde el techo y las paredes laterales están perforados, lo que representa entre una pared sólida y una sección abierta, o una sección de pared adaptativa donde el contorno del techo y la pared pueden configurarse de forma manual.

El aire, que proviene de las líneas de corriente, altera su curvatura que coincide con la estructura de la pared dentro de un circuito de clase cerrada. Para un circuito semi – abierto, el aire actuará de forma sobre – expandida en el límite del habitáculo de prueba, dando lugar que este fluido formalice la presión circulante a través de la variación de su curvatura.

Un túnel de pared ranurada es utilizado principalmente para subsanar los efectos de estancamiento e inconsistencia en el choque del flujo al ejecutar pruebas transónicas, por tanto, en pruebas con un cuerpo de farol, Figura 11, es necesario que el ensayo sea realizado con un flujo a baja velocidad (SAE International, 2016, p. 8).

Figura 11*Cuerpo de farol*

Nota. U_∞ determina la dirección que experimenta el flujo sobre el cuerpo de farol. Tomado de: (SAE International, 2016)

4.1.3.3 Simulación de la base por cinta móvil

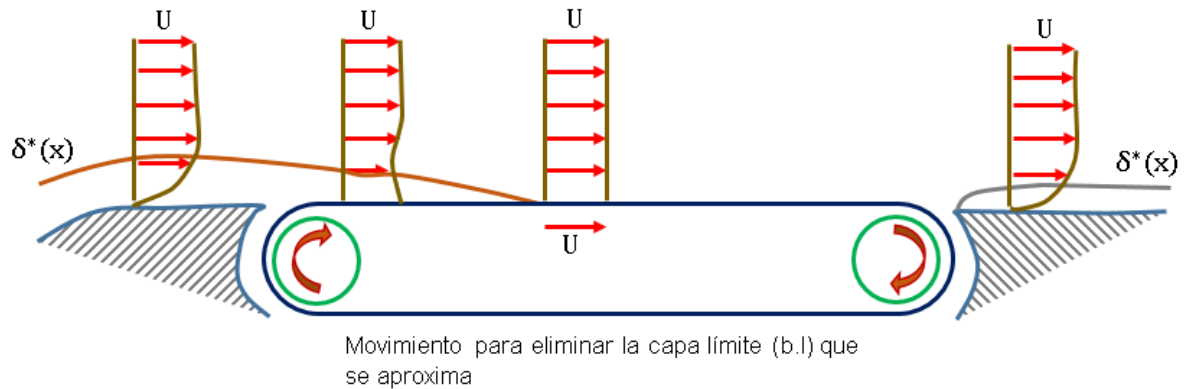
La simulación de cinta tiene un gran valor en el estudio aerodinámico puesto a que este simula el terreno de la carretera, ya que de momento es considerada con el único proceso que permite nivelar la capa límite. Este último término, proviene del inglés *boundary layer* y es conocido de forma abreviada como b.l., indica la región de alteración del fluido al ponerse en contacto con un objeto, obteniéndose un flujo directo. Por tanto, en la Figura 12, es posible comprender el comportamiento de la capa límite al inducir una cinta móvil para la representación del terreno, que requiere mayor atención en la calibración de la presión dinámica, nivelación de la rueda, dimensión finita y estabilidad de la banda, esto con la finalidad de reducir inconvenientes en la lectura de datos (SAE International, 2016, p. 12).

La Tabla 19 expresa las nomenclaturas puestas en ejecución sobre la explicación de la distribución móvil del terreno posicionado en la cámara de ensayo

Tabla 19*Términos del sistema móvil*

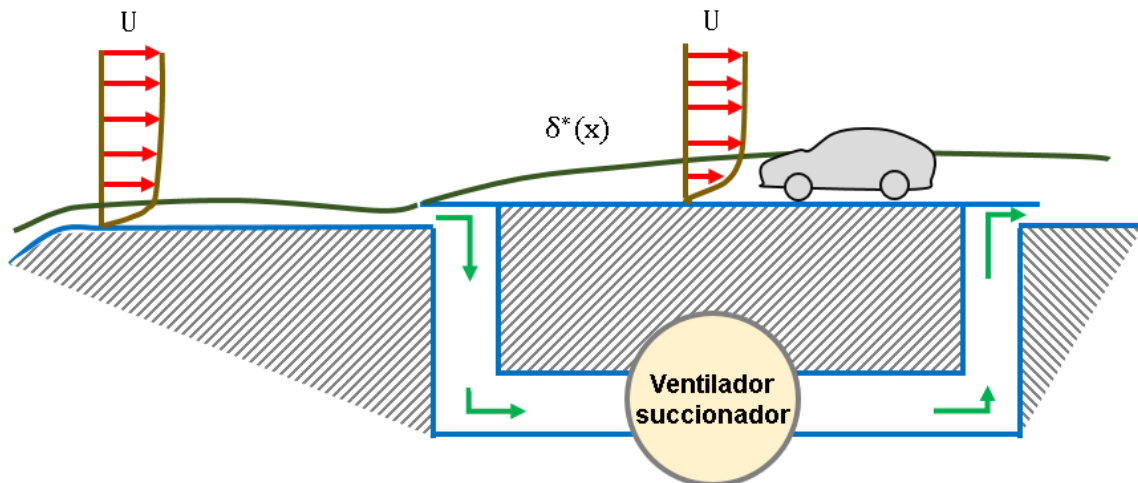
Nomenclatura		Subíndices		Abreviaturas	
Re_x	Número de Reynolds sobre x	e	Borde la capa límite	b.l.	Capa límite o boundary layer
U	Componente de velocidad en dirección de la corriente fuera de la capa límite	w	Pared (plano del terreno o suelo)	GPBL	Capa límite del plano del terreno

Nota. Tomado de: (SAE International, 2016, p. 14)

Figura 12*Sistema de banda móvil*

Nota. El movimiento de la banda es producido debajo de la superficie donde reposará el cuerpo de estudio. Tomado de: (SAE International, 2016, p. 12).

En la translación en la cinta, que simula la superficie de la carretera, aparecen cuatro configuraciones adicionales en comparación a la Figura 12, que son proporcionadas por la normativa SAE International. La primera configuración (Figura 13), determina la implementación de un ventilador que concede la absorción de cierta parte del flujo inducido en la cámara de ensayo, favoreciendo el equilibrio de la capa límite.

Figura 13*Control de la capa límite por medio del sistema de cuchara*

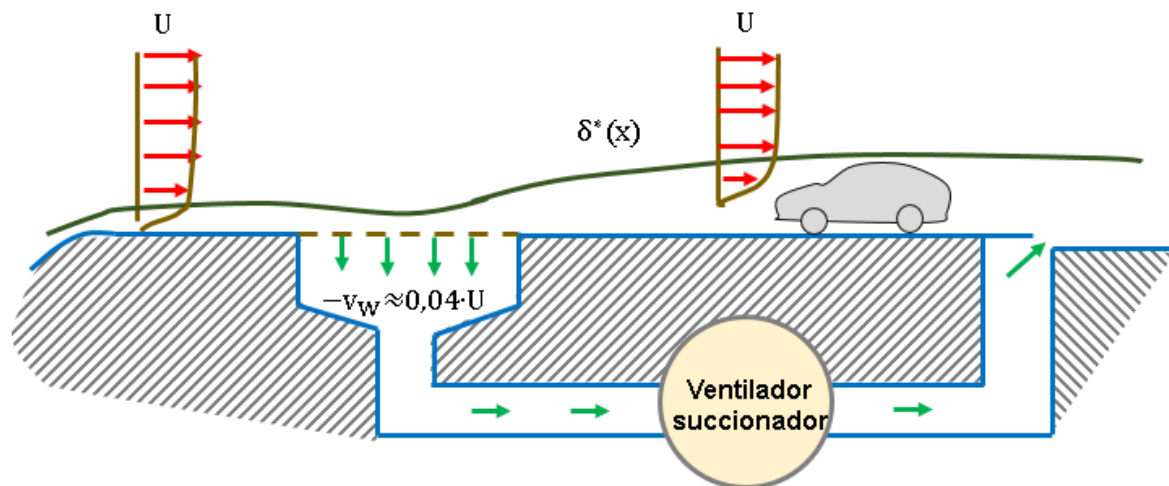
Nota. El sistema de cuchara o scoop (del término original en inglés), lleva en efecto aquel nombre por la acción de remover el flujo dentro del habitáculo de prueba. Tomado de: (SAE International, 2016, p. 13).

El modelo vehicular (Figura 13) estará ubicado sobre la base que incorpora al ventilador succionador, con la finalidad de que en el extremo izquierdo y derecho pueda disponer de un desfase apropiado para la apertura del flujo que ingresa por la boquilla de entrada. Este proceso

es visible por medio de las flechas verdes a lo igual que sucede con el sistema de succión simple presentado en la Figura 14, sin embargo, esta técnica plantea el uso de ranuras en la apertura de entrada sin desfase, mientras que en su salida establece dicho desfase que dependerá de la investigación y de los neumáticos del sólido.

Figura 14

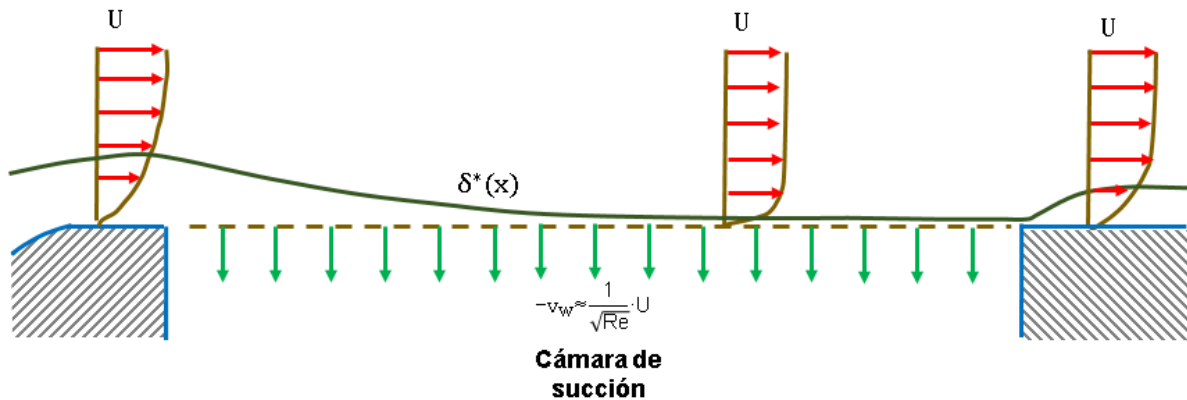
Sistema de captación simple por medio de ranuras



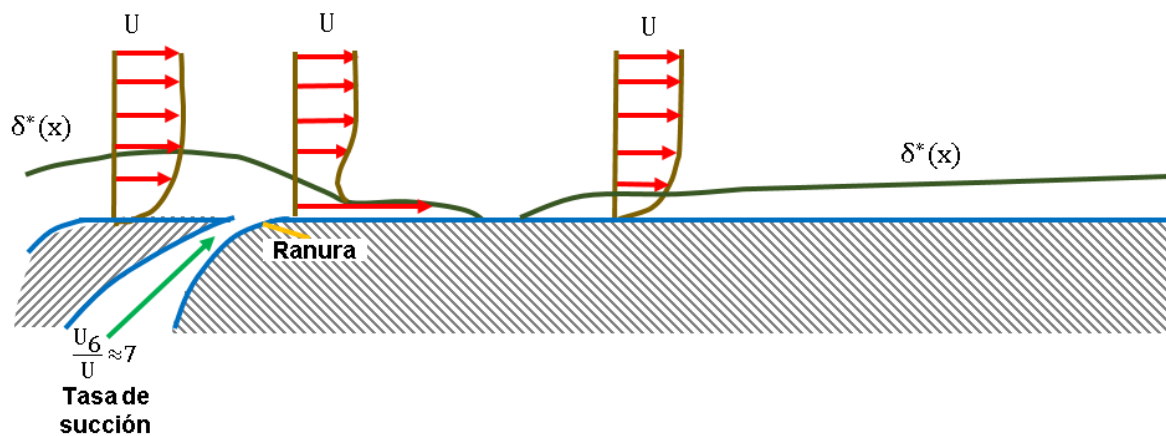
Nota. El símbolo de $\delta^*(x)$, indica el espesor de desplazamiento de la capa límite que circula en el cubículo. Tomado de: (SAE International, 2016, p. 13).

Al requerir el valor del ángulo de flujo, es necesario regular la capa límite del plano de la superficie o *GPBL*, de sus siglas en inglés.

La cámara de succión, permite controlar el crecimiento de la capa límite por medio de las distribuciones mostradas en la Figura 15. Para este sistema, la velocidad de soplado, expresado en v_w , variaría en distintos puntos por motivos de la condición o especificación de la carretera a ser analizada, siendo esta la causa de arrojar valores imprecisos relacionados a la configuración del vehículo utilizado para la investigación, para ello v_w/U tiene que ser negativo con el número de $Re-0.5$

Figura 15*Control de la capa límite por succión distribuida**Nota.* Tomado de: (SAE International, 2016, p. 13)

La Figura 16 muestra la última configuración de distribución por soplado tangencial, mencionada en la literatura SAE, que hace uso de un chorro de pared fina de elevada propulsión que es proyectada de forma rápida en la frontalidad del vehículo y por debajo de la placa del suelo.

Figura 16*Expulsión tangencial**Nota.* Tomado de: (SAE International, 2016, p. 14)

El soplado tangencial es considerado como la técnica de distribución ideal para las pruebas a gran escala, en modelos de automóviles inferiores a la escala real, se deberá poner en práctica el sistema de banda móvil o un método más convencional, por ejemplo, el método scoop o de succión, los cuales van a depender de la complejidad del proyecto (SAE International, 2016, p. 14).

4.2 Normativa para la toma de datos

El tratamiento de resultados sobre el vehículo emplea la normativa SAE J2881, mientras que la ISO 17713-1 hace referencia al procedimiento implementado para el flujo que recorre la cámara de ensayo de un túnel de viento a base del anemómetro, como instrumento de medida.

4.2.1 SAE J2881

Carga del automóvil

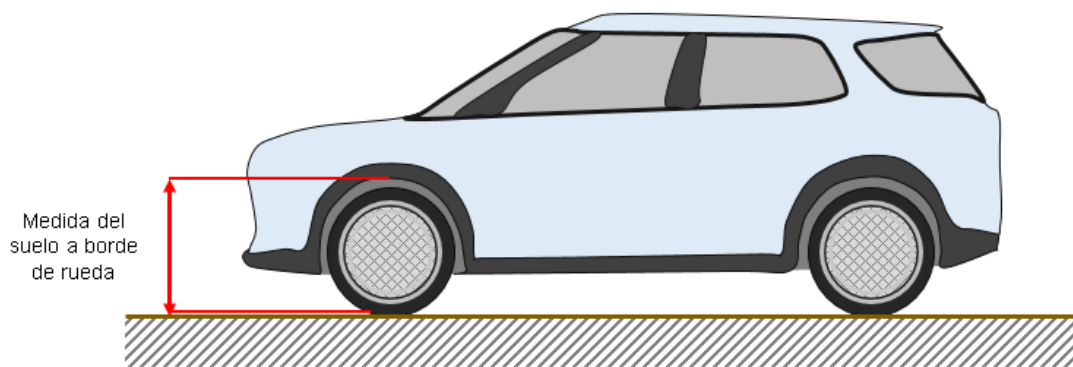
La normativa recomienda, de forma alternativa, cargar únicamente los dos asientos delanteros con un peso de 70 kilogramos para cada uno, sin embargo, en la sección de anexos por medio de la (ver Figura 66), se determina el cargamento de acuerdo a la configuración del vehículo dispuesto para la investigación.

Posición del automóvil

La posición determina la postura del vehículo, que es medida desde el suelo de la cámara de ensayo hasta el borde de la rueda.

Figura 17

Medición de la posición del automóvil



Nota. La medida es efectuada desde la planicidad del suelo hacia la mitad del borde de rueda, es decir, parte intermedia del guardabarros.

Configuración de instalación y prueba

Las configuraciones manejadas para pruebas en modelos a escala 1:1 son mencionadas en la Tabla 20.

Tabla 20*Requisitos de prueba*

No.	Configuración	Descripción
1	Ángulo de guiñada	Al considerar el ángulo de guiñada para el vehículo, este tendrá que ser regulado a $0 \pm 0,1$ grados con ruedas centradas en un ángulo de dirección nula o cero.
2	Presión del neumático	La presión de los neumáticos es determinada de acuerdo a la especificación del fabricante.
3	Nivel del fluido	El nivel del fluido del depósito de combustible, aceite del motor, refrigerante, transmisión, limpiaparabrisas, frenos y dirección, serán llenados de manera nominal.
4	Ventilador de refrigeración	El ventilador de atenuación térmica del radiador no deberá recibir energía para su giro libre, por el cual, es necesario bloquear el embrague en los ventiladores vinculados al motor.
5	Sistema HVAC	El conjunto HVAC integra los factores calorífero, ventilación y climatización. Este sistema tendrá que ser apagado.
6	Limpiaparabrisas	Por medio de la posición de estacionamiento serán puestos los limpiaparabrisas.
7	Antena electromagnética	Si existe la posibilidad de que la antena pueda retraerse en su totalidad tendrá que efectuarse realizada, caso contrario, permanecerán fijas e instaladas en el vehículo.
8	Retrovisores	Ajustar los espejos exteriores del vehículo en una posición nominal de visualización.
9	Techo y puertas trasera	Esta configuración hace mención a los vehículos convertibles o de techo retractiles que deben estar cerrados durante la ejecución de las pruebas, a lo igual que la puerta trasera o caja de carga de la camioneta.
10	Prueba de velocidad	La adaptación de la velocidad aerodinámica para el ensayo ronda los 110 y 140 km/h o una presión dinámica equivalente.

Nota. El operario tendrá que desactivar el freno de estacionamiento, al momento de ejecutar la prueba en la corredera 1:1.

Tomado de: (SAE International, 2019, pp. 5 - 6)

Procesamiento de datos

Este apartado establece la forma de ordenar los datos captados en la ejecución de prueba aerodinámica. La información del vehículo y túnel, deberá plasmarse acorde a la Figura 67 y Figura 68, ubicado en la sección de anexos, (ver página), según especifica la normativa SAE J2084.

Los campos generales a completarse con respecto al túnel de viento utilizado para documentar la investigación aerodinámica, serán los siguientes.

- a. Nombre y localización del túnel de viento
- b. Dimensiones y fotografías de la investigación
- c. Presión
- d. Simulación del suelo

4.2.2 ISO 17713-1

Determina los ensayos realizados dentro del túnel de viento mediante la instrumentación del anemómetro, sea de configuración por copa o hélice. En efecto, para el ensayo en el túnel a escala, se ha propuesto utilizar el tipo hélice, el mismo que en Figura 18 presenta sus funciones y partes, mientras que en la sección de anexo por medio de (ver Tabla 141), condiciona sus características principales.

Figura 18

Componentes del anemómetro de tipo hélice



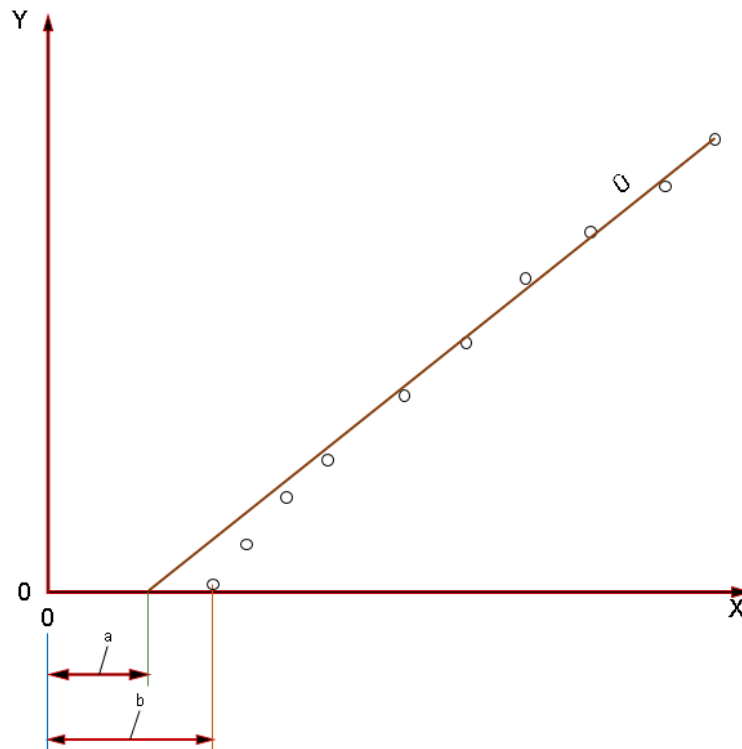
Nota. El anemómetro cuenta con un puerto de salida USB para el envío de datos mediante la previa instalación del software privado ofrecido por el fabricante.

Método de prueba

El umbral de inicio (U_0) es precisado mediante la mensuración de la velocidad más despreciable al momento que el anemómetro comienza a mover su rotor. El eje de este utensilio de sondeo, cuando sea trate de configuración por hélice, estará enfilado en forma paralela a la dirección del fluido, mientras que el de tipo copa, la alineación es perpendicular a la trayectoria del flujo (ISO, 2007, p. 3).

La Figura 19 muestra la curva típica de calibración para el anemómetro, sea de tipo copa o hélice también conocido como propela, donde la velocidad que alcanza el viento dentro del túnel está dada por x intervenido por U dado en metros por segundos, mientras que la variable y , representa la tasa de rotación de R condicionado en revoluciones por segundos. La letra a define el desplazamiento de cero y el umbral inicial es señalado por b ; el primero está gobernado por a , en tanto el segundo viene fijado por U_0 , ambos manejan la unidad de metros por segundos.

Figura 19
Curva de calibración



Nota. El desplazamiento en cero (a) mantiene una recta continua, por otro lado, el umbral inicial (b) dispone de variaciones en su trayecto. Tomado de: (ISO, 2007, p. 4).

Rotación

Existirán limitantes en la repetición de la medición por efectos de la sensibilidad o precisión dado por el transductor del anemómetro. El sistema de registro determina la velocidad del viento con una resolución mínima de $0,02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (ISO, 2007, p. 6).

Tiempo

La resolución del tiempo (T_R) permuta a medida que diversifica la velocidad en el túnel de viento. Para medir una distancia constante a resoluciones de 0,1 metros, exigirá una concisión de tiempo de 0,05 segundos a $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, y cuando la velocidad del flujo sea $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, la resolución de tiempo tiende a ser 0,01 s.

$$T_R = \frac{M_R}{U} \quad (52)$$

Donde:

T_R = tiempo de resolución

M_R = resolución constante

U = velocidad del viento

Ángulo de ataque

La concisión del ángulo de ataque, representado simbólicamente como θ , necesita de manera obligatoria que este dentro de $0,5^\circ$ debido a que propicia una medición con alta resolución, y para garantizarlo deberá inducirse un objeto auxiliar que facilite alinear el anemómetro con el ángulo exterior al eje de la corredera (ISO, 2007, p. 7).

Distancia constante

Es necesario que el dispositivo de medición este ubicado en un sector fijo al ejecutar las pruebas en el túnel y cuente con un mecanismo de bloqueo para obstaculizar el balanceo del rotor cuando no exista influencia de flujo (ISO, 2007, p. 7).

A continuación, se presenta el formato que otorga la norma ISO 17713-1 para el registro de valores al ejecutar los ensayos con el anemómetro.

Tabla 21

Umbral inicial (U_o)

Designaciones	Número de corridas									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperatura ($^\circ\text{C}$)										
Punto de rocío ($^\circ\text{C}$) o Humedad relativa (%)										
Presión barométrica (hPa)										
Densidad del aire ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)										
Velocidad del air en el túnel ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)										

Nota. Tomado de: (ISO, 2007, p. 7)

4.3 Metodología analítica respecto al dimensionamiento de las secciones del prototipo

En primer lugar, es indispensable empezar por establecer el tamaño de la cámara en la que se va a situar el objeto para efectos de estudio, esto implica a que se requiera obtener el área de la pieza vista desde una perspectiva frontal, que en este caso estaría sujeta para elementos vehiculares.

4.3.1 Área frontal del objeto

Las características iniciales del modelo tomado como referencia, corresponde a un vehículo Ford Mustang GT500 en proporción de escala por reducción de 1:20.

Para Rodríguez García y Villar Paúl (2017), el área frontal de un modelo vehicular puede determinarse y estimarse mediante la utilización de la siguiente fórmula (p. 12):

$$A_f = f \cdot b \cdot h \quad (53)$$

Donde:

A_f = área frontal del modelo

f = constante adimensional (comúnmente se sitúa en un valor 0,85)

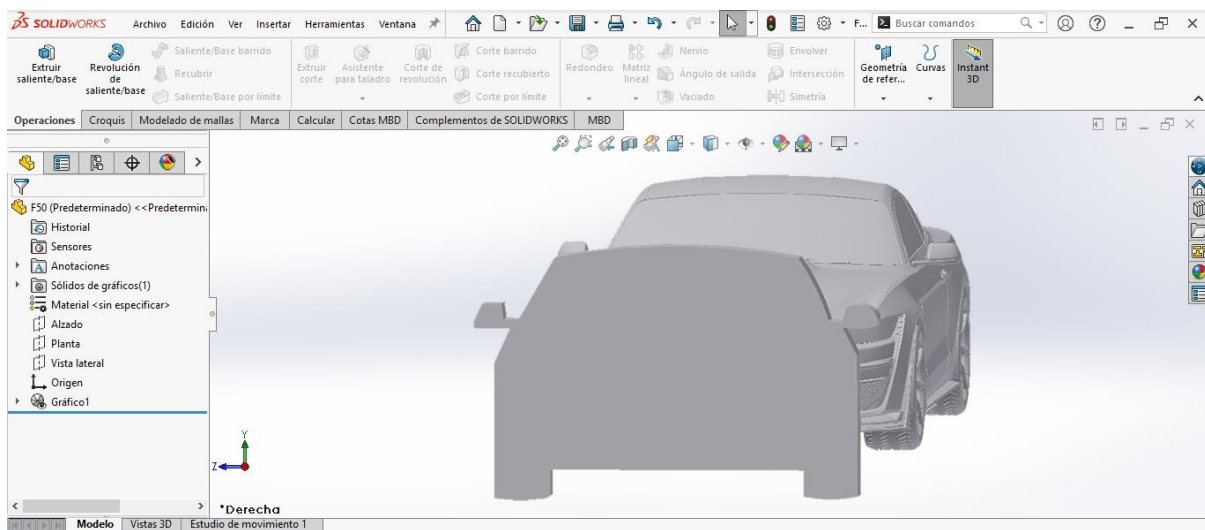
b = ancho del modelo

h = altura del modelo

Sin embargo, para el presente caso, se llevará a cabo la construcción del perfil frontal del modelo tomado como referencia, mediante la creación y extrusión de un boceto en el software SolidWorks 2022, para de esta manera poder obtener su área (m^2).

Figura 20

Área frontal del modelo



Nota. Se considera replicar todo el aspecto frontal de vehículo modelo, incluyendo los retrovisores.

El área frontal aproximada del modelo corresponde $A_f = 0,00573 m^2$.

Una vez determinada el área frontal del modelo, se prosigue con el cálculo de la dimensión de la sección de pruebas y de las demás secciones del circuito.

4.3.2 Cámara de ensayos

Área transversal de la cámara de pruebas

Reestructuración de la Ecuación (1):

Se toma en cuenta el despeje de la variable A_{ts} del precepto presentado en la Ecuación (1), luego de aquello se agrupan los datos requeridos y seguidamente se realiza el procedimiento de cálculo.

$$A_{ts} = \frac{A_f}{R_b} \quad (54)$$

Recolección de los datos:

Tabla 22

Información para el cálculo del área de la cámara de prueba

Simbología	Significado	Valor	Unidad
A_{f_0}	Área frontal del objeto	0,0057	m ²
R_b	Tasa de relación de bloqueo	30,00% ^a	–

Nota. ^a Corresponde al límite de bloqueo máximo planteado según el criterio del personal investigativo.

Sustitución de valores:

$$A_{ts} = \frac{0,0057}{30\%}$$

$$A_{ts} = 0,0191 \text{ m}^2$$

Ancho de la cámara

Partiendo de la estructura matemática definida en la Ecuación (2), se puede desglosar la formulación pertinente en cuanto a determinar el ancho de la sección de ensayos.

Reestructuración de la Ecuación (2):

Se efectúa el despeje de la variable de anchura de la cámara de prueba (w_{ts}), lo cual da como resultante la ecuación que se muestra en breve.

$$w_{ts} = (w:h) \cdot h_{ts} \quad (55)$$

Reestructuración de la Ecuación (55):

Al tener como información el dato del área transversal de la cámara de ensayos (A_{ts}), la misma que ha sido deducida con anterioridad, y conociendo que dicha área para una sección rectangular es producto de la multiplicación por dos de sus lados distintos ($a \cdot b$), y que en el caso de una sección cuadrada, el área de esta resulta al elevar a uno de sus lados con un exponente de 2do grado (a^2), entonces es factible reemplazar la variable altura (h) por la raíz cuadrada del área transversal, además la relación ancho – alto ($w:h$) también deberá estar dentro de aquella operación matemática, debido a que se trata de relacionar dicho parámetro a

las dimensiones que vayan a obtenerse, así que, la ecuación queda replanteada de la siguiente manera.

$$w_{ts} = \sqrt{A_{ts} \cdot (w:h)} \quad (56)$$

Recolección de los datos para la Ecuación (56):

Tabla 23

Información para el cálculo del ancho de la cámara de prueba

Simbología	Significado	Valor	Unidad
A_{ts}	Área transversal de la cámara de pruebas	0,0191	m ²
w:h	Relación ancho - alto	1	—

Sustitución de valores:

$$w_{ts} = \sqrt{0,0191 \text{ m}^2 \cdot 1}$$

$$w_{ts} = 0,1382 \text{ m}$$

Altura de la cámara

Se puede tomar de referencia el criterio propuesto y descrito con antelación para el establecimiento de la Ecuación (56), en la que se hace mención la reorganización de la Ecuación (2), respecto al caso en que no se dispone de la información de una cierta variable. Para ello, como primer punto se debe despejar la variable altura (h_{ts}) de la ecuación en que se basará este método, para que luego se lleve a cabo la aplicación del fundamento antes mencionado.

Reestructuración de la Ecuación (2):

$$h_{ts} = \sqrt{\frac{A_{ts}}{w:h}} \quad (57)$$

También será válido que simplemente se opte por reemplazar los valores ya conocidos (siempre y cuando se haya calculado anticipadamente el ancho de la cámara de ensayo) en la fórmula que se plantea a continuación, para lo cual se tiene que primero despejar la variable de común interés de la Ecuación (2).

$$h_{ts} = \frac{w_{ts}}{w:h} \quad (58)$$

Recolección de datos para la aplicación de la Ecuación (58):

Tabla 24*Información para el cálculo de la altura de la cámara de prueba*

Simbología	Significado	Valor	Unidad
w_{ts}	Ancho de la cámara de ensayos	0,1382	m
$w:h$	Relación ancho – alto de la cámara	1	–

Sustitución de valores:

$$h_{ts} = \frac{0,1382 \text{ m}}{1}$$

$$h_{ts} = 0,1382 \text{ m}$$

Al visualizar igualdad en los resultados de las dimensiones de anchura y altura obtenidas para la cámara de ensayos, se puede denotar que la geometría del área frontal tanto de la parte delantera y posterior es de forma cuadrangular, debido a que el número de la relación de ancho – alto escogido, interviene directamente sobre esta condición. Sin embargo, es importante mencionar que, si es que esta relación fuese distinta a 1, la forma geométrica de la cámara de prueba probablemente cambiará a rectangular.

Perímetro mojado de la cámara de ensayos

Mediante la resolutive del perímetro humedecido de la cámara de ensayos, se permitirá calcular más adelante otros parámetros de interés en el actual capítulo.

De acuerdo a la condición de aspecto no circular de la sección transversal de la cámara de ensayos, especificada con anterioridad, se aplica el desarrollo de la Ecuación (3), tomando como dato uno de los lados de la cámara de pruebas (válido para este caso debido a la igualdad de los lados del área de la sección, al ser de geometría cuadrada), que posee un valor de 0,1382 metros.

Sustitución de valores:

$$PM = 4 \cdot 0,1382 \text{ m}$$

$$PM = 0,5330 \text{ m}^2$$

Diámetro hidráulico de la cámara de ensayos

Teniendo en consideración el área transversal y el perímetro mojado de la cámara de ensayos, se puede obtener el diámetro hidráulico de aquella sección mediante la atribución de la Ecuación (4).

Recolección de los datos:

Tabla 25*Información para el cálculo del diámetro hidráulico*

Simbología	Significado	Valor	Unidad
A	Área transversal de la cámara de pruebas	0,0191	m ²
PM	Perímetro humedecido de la cámara de pruebas	0,5530	m

Sustitución de valores:

$$D_h = \frac{4 \cdot 0,0191 \text{ m}^2}{0,5530 \text{ m}}$$

$$D_h = 0,1382 \text{ m}$$

A continuación, se desarrolla otra formulación de común implementación para obtener el diámetro hidráulico de un ducto cuadrado, en la que se considera el valor de la dimensión de uno de los lados de la cámara de pruebas (0,1382 metros).

Sustitución de valores para la aplicación de la Ecuación (5):

$$D_h = \frac{4 \cdot (0,1382 \text{ m})^2}{4 \cdot 0,1382 \text{ m}}$$

$$D_h = 0,1382 \text{ m}$$

Como se puede apreciar, tanto en la aplicación de la Ecuación (4) y la Ecuación (5), se ha obtenido el mismo resultado en función al valor del D_h de la sección de prueba, por lo que ambos métodos son aplicables para el caso actual.

Longitud de la cámara de prueba

*Recolección de los datos:***Tabla 26***Información para el cálculo de la longitud de la cámara de prueba*

Simbología	Significado	Valor	Unidad
$D_{h_{ts}}$	Diámetro hidráulico de la cámara de ensayo	0,1382	m
l: dha	Relación de longitud – diámetro hidráulico	3	–

Nota. ^a La relación entre la longitud y la altura seleccionada, corresponde a un valor típico, comúnmente usado para el diseño de la cámara de prueba.

Sustitución de valores:

$$L_{ts} = 0,1382 \text{ m} \cdot 3$$

$$L_{ts} = 0,4147 \text{ m}$$

4.3.3 Cámara de la Contracción

Para determinar los aspectos dimensionales más relevantes acerca de la tobera de convergencia, se considera relacionar en primer lugar su área de salida (A_{2c}), con el área de la cámara de ensayos (A_{ts}).

Área transversal a la salida de la contracción

Tomando en cuenta que el área de salida de la tobera convergente está adherida a el área de entrada de la cámara de pruebas, se realiza la siguiente relación.

$$A_{2c} = A_{ts} \quad (59)$$

Donde:

A_{2c} = área de salida de la sección

A_{ts} = área de la sección de prueba

Por tanto, las caras dimensionales a la entrada de la cámara de ensayos y a la salida de la contracción, son idénticas, por lo cual se toma como referencia el valor del área de prueba.

Sustitución de valores:

$$A_{2c} = 0,0191 \text{ m}^2$$

Área transversal a la entrada de la contracción

Para este inciso se considera la relación de contracción que se desea atribuir en torno a la confección del perfil de la tobera de entrada. Se hace mención en el hecho de que la selectividad de una relación de contracción mayor a 6 (número sin magnitud), tendrá como resultado la presencia de un área de entrada más dimensionada para la cámara de convergencia.

Restructuración de la Ecuación (7):

De la Ecuación (7), se despeja la variable a la que se necesita encontrar su designación numérica.

$$A_{1c} = A_{2c} \cdot R_c \quad (60)$$

Recolección de los datos:

Tabla 27

Información para el cálculo del área de entrada de la contracción

Simbología	Significado	Valor	Unidad
A_{2c}	Área transversal a la salida de la contracción	0,0191	m ²
R_c	Relación de contracción	6 ^a	–

Nota. ^a La cifra de selección de la relación de contracción, corresponde al límite mínimo aceptado para la determinación del área de la región delantera.

Sustitución de valores:

$$A_{1c} = 0,0191 \text{ m}^2 \cdot 6$$

$$A_{1c} = 0,1147 \text{ m}^2$$

Ancho del área transversal a la entrada de la contracción

Para calcular la anchura la zona de entrada de la cámara de convergencia, se asume la estructura planteada en la Ecuación (56), en donde únicamente se adecuará las simbologías de las componentes de dicha fórmula a las nomenclaturas correspondientes de la presente sección (cono de contracción). Por tanto, la relación entre el ancho – alto para la actual cámara, pertenecerá al mismo criterio que haya sido seleccionado previamente para definir las dimensiones en la cámara de pruebas.

$$w_c = \sqrt{A_{1c} \cdot w:h} \quad (61)$$

Donde:

w_c = anchura de la contracción

A_{1c} = área a la entrada de la contracción

w:h = relación de ancho – alto

Recolección de los datos:

Tabla 28

Información para el cálculo del ancho a la entrada de la contracción

Simbología	Significado	Valor	Unidad
A_{1c}	Área transversal a la entrada de la contracción	0,1147	m ²
w:h	Relación de ancho - alto	1 ^a	–

Nota. ^a La tasa de relación geométrica ha sido adaptada de forma directa a partir del criterio dispuesto en el cálculo de ancho y alto de la cámara de prueba.

Sustitución de valores:

$$w_c = \sqrt{0,11467 \text{ m}^2 \cdot 1}$$

$$w_c = 0,3386 \text{ m}$$

Altura del área transversal a la entrada de la contracción

Sosteniendo la tasa de relación de $w:h$ dictaminada en el procedimiento anterior, y al despejar la incógnita altura valiéndose del formato presentado en la Ecuación (2), se considera lo siguiente.

$$h_c = \frac{w_c}{w:h} \quad (62)$$

Donde:

h_c = altura de la contracción

w_c = anchura a la entrada de la contracción

$w:h$ = relación entre la anchura – altura de la cámara

Recolección de los datos:

Tabla 29

Información para el cálculo de la altura de la contracción

Simbología	Significado	Valor	Unidad
w_c	Ancho del área a la entrada de la contracción	0,3386	m
$w:h$	Relación de ancho – alto para la cámara de la contracción	1	–

Sustitución de valores:

$$h_c = \frac{0,3386 \text{ m}}{1}$$

$$h_c = 0,3386 \text{ m}$$

Longitud de la tobera de convergencia

Es sustancial aclarar que, para el vigente caso no se tomará en consideración el criterio de longitud señalado en páginas anteriores, por motivo de las características que han sido propuestas inicialmente para el diseño del prototipo, por lo que la distancia de la longitud de la contracción en sentido de la dirección de la corriente del aire, es obtenida mediante la siguiente representación que hace referencia a:

$$L_c = \sqrt{A_{1c}} \quad (63)$$

A continuación, se toma como dato, el valor del área transversal a la entrada de la contracción (0,1147 metros cuadrados).

Sustitución de valores:

$$L_c = \sqrt{0,1147 \text{ m}^2}$$

$$L_c = 0,3386 \text{ m}$$

Perfil parcial lateral de la contracción

Cabe mencionar que las ecuaciones polinómicas descritas anteriormente (ver pág. 21), permitirán obtener de primera mano el segmento o cara simétrica superior de la contracción, sin embargo, por revisión de criterios de los filántropos del área aerodinámica, se seleccionará la Ecuación (10), para esto, preliminarmente se ve necesario que cada uno de los valores que correspondan a las variables desglosadas en la Ecuación (12), deberán ser divididas entre dos.

Aplicación de la Ecuación (12):

Principalmente se ha decidido dividir entre 40 partes iguales el valor de la longitud de la contracción, para dar lugar a cada una de las integrantes horizontales del eje x, por lo que se designa la siguiente relación:

$$x = \left(\frac{\text{Factor de división}}{\text{Número de puntos en el eje x requeridos}} \right) \cdot \text{Longitud de la contracción} \quad (64)$$

Se toma de referencia la Ecuación (64), y luego se realiza la división entre la longitud de la tobera, obteniendo así la relación de distancia.

Tabla 30

Coordenadas cartesianas del eje x

Factor de división	Puntos totales requeridos para el sistema cartesiano	Longitud total de la cámara de convergencia (m)	Componentes del eje de las abscisas resultantes ^a (m)	Distancia no dimensional de la contracción (adimensional)
1	40	0,3386	0,0085	0,0250
2	40	0,3386	0,0169	0,0500
3	40	0,3386	0,0254	0,0750
4	40	0,3386	0,0339	0,1000
5	40	0,3386	0,0423	0,1250
6	40	0,3386	0,0508	0,1500
7	40	0,3386	0,0593	0,1750
8	40	0,3386	0,0677	0,2000
9	40	0,3386	0,0762	0,2250
10	40	0,3386	0,0847	0,2500
11	40	0,3386	0,0931	0,2750
12	40	0,3386	0,1016	0,3000
13	40	0,3386	0,1101	0,3250
14	40	0,3386	0,1185	0,3500
15	40	0,3386	0,1270	0,3750
16	40	0,3386	0,1355	0,4000
17	40	0,3386	0,1439	0,4250
18	40	0,3386	0,1524	0,4500
19	40	0,3386	0,1608	0,4750
20	40	0,3386	0,1693	0,5000
21	40	0,3386	0,1778	0,5250
22	40	0,3386	0,1862	0,5500
23	40	0,3386	0,1947	0,5750
24	40	0,3386	0,2032	0,6000
25	40	0,3386	0,2116	0,6250
26	40	0,3386	0,2201	0,6500
27	40	0,3386	0,2286	0,6750
28	40	0,3386	0,2370	0,7000
29	40	0,3386	0,2455	0,7250
30	40	0,3386	0,2540	0,7500
31	40	0,3386	0,2624	0,7750
32	40	0,3386	0,2709	0,8000
33	40	0,3386	0,2794	0,8250
34	40	0,3386	0,2878	0,8500
35	40	0,3386	0,2963	0,8750
36	40	0,3386	0,3048	0,9000
37	40	0,3386	0,3132	0,9250
38	40	0,3386	0,3217	0,9500
39	40	0,3386	0,3302	0,9750
40	40	0,3386	0,3386	1,0000

Nota. ^a Equivalen a los puntos del conjunto cartesiano que entrelazarán entre sí, para constituir el perfil de la contracción.

Aplicación de la Ecuación (10):

Se muestra la condición que deben suplir los datos que se indican en la tabla siguiente, para así dar paso a la determinación de la altura de la contracción subdivida en coordenadas (H):

Tabla 31

Información para el cálculo de la altura por tramo del área en la contracción

Simbología	Significado	Valor	Unidad
H_i	Altura en la entrada de la contracción (altura máxima)	0,1693	m
H_e	Altura de la salida de la contracción (altura mínima)	0,0691	m
X'	Distancia no dimensional en sentido de la corriente de flujo	$0 \leq X' \leq L_c$	–

Nota. Respecto a los datos adjuntados, se ha considerado la extracción de su mitad a partir de sus resultados calculados inicialmente, a excepción de la fila de la relación entre la coordenada axial y de la longitud total (X').

Empleando la Ecuación (10) y sustituyendo los datos respectivos, se consigue obtener la tabla de resultados que se adjunta a continuación.

Tabla 32

Altura por estructuración de puntos en la contracción

No. de par ordenado	Altura inicial máxima parcial H_i (m)	Altura final mínima parcial H_e (m)	Relación de distancia no dimensional X' (adimensional)	Altura resultante seccionada horizontalmente H (m)
1 ^a	0,1693	0,0691	0	0,169313
2	0,1693	0,0691	0,0250	0,169298
3	0,1693	0,0691	0,0500	0,169197
4	0,1693	0,0691	0,0750	0,168936
5	0,1693	0,0691	0,1000	0,168455
6	0,1693	0,0691	0,1250	0,167704
7	0,1693	0,0691	0,1500	0,166646
8	0,1693	0,0691	0,1750	0,165254
9	0,1693	0,0691	0,2000	0,163510
10	0,1693	0,0691	0,2250	0,161405
11	0,1693	0,0691	0,2500	0,158941
12	0,1693	0,0691	0,2750	0,156126
13	0,1693	0,0691	0,3000	0,152974
14	0,1693	0,0691	0,3250	0,149506
15	0,1693	0,0691	0,3500	0,145751
16	0,1693	0,0691	0,3750	0,141739
17	0,1693	0,0691	0,4000	0,137508
18	0,1693	0,0691	0,4250	0,133097
19	0,1693	0,0691	0,4500	0,128548
20	0,1693	0,0691	0,4750	0,123906
21	0,1693	0,0691	0,5000	0,119217
22	0,1693	0,0691	0,5250	0,114529
23	0,1693	0,0691	0,5500	0,109887
24	0,1693	0,0691	0,5750	0,105338
25	0,1693	0,0691	0,6000	0,100926
26	0,1693	0,0691	0,6250	0,096695
27	0,1693	0,0691	0,6500	0,092683
28	0,1693	0,0691	0,6750	0,088928
29	0,1693	0,0691	0,7000	0,085461
30	0,1693	0,0691	0,7250	0,082309
31	0,1693	0,0691	0,7500	0,079493
32	0,1693	0,0691	0,7750	0,077029
33	0,1693	0,0691	0,8000	0,074925
34	0,1693	0,0691	0,8250	0,073180
35	0,1693	0,0691	0,8500	0,071788
36	0,1693	0,0691	0,8750	0,070730
37	0,1693	0,0691	0,9000	0,069979
38	0,1693	0,0691	0,9250	0,069498
39	0,1693	0,0691	0,9500	0,069238
40	0,1693	0,0691	0,9750	0,069137
41	0,1693	0,0691	1,0000	0,069122

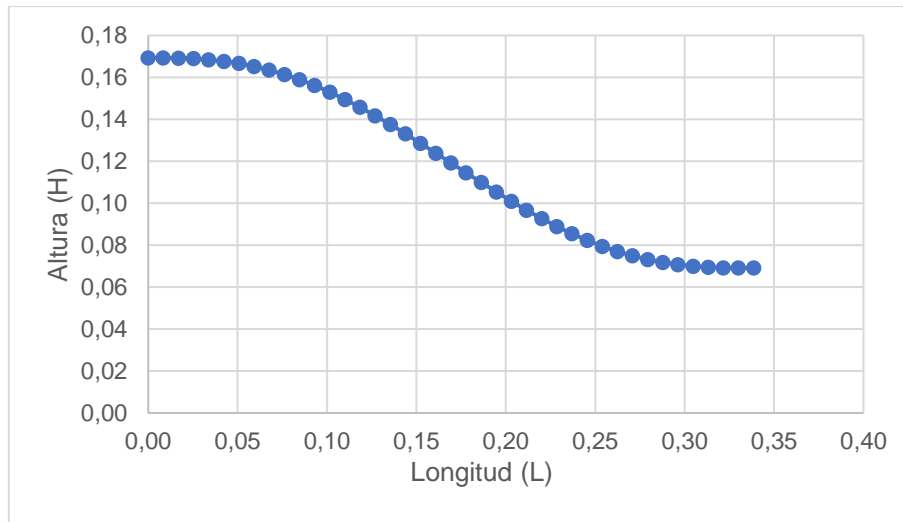
Nota. La tabla enfatiza la altura en la contracción según la condición numérica del tramo que está relacionado con el par ordenado.

^a La primera fila del par ordenado representa al punto de origen o intersección que posee de manera general un sistema cartesiano, lo que influye a que finalmente se obtenga 41 puntos ordenados.

Inmediatamente después que se haya hallado las alturas correspondientes al número de áreas divisorias en la cámara, se procede a tomar los datos de la cuarta columna de la Tabla 30 y los datos de la quinta columna de la Tabla 32, lo cual facilitará plasmar el resultado gráfico del contorno característico de la contracción.

Figura 21

Perfil seccionado de la contracción en vista lateral



Nota. La separación vertical existente entre el par ordenado (0,3386; 0,0691) hasta el punto cartesiano (0,3386; 0), corresponde a la altura parcial de la cámara de prueba.

Punto de coincidencia de los radios que integran el perfil de la contracción

Por medio de la relación siguiente se puede tener el punto de encuentro o intersección de los radios en el plano cartesiano. Cabe señalar que para esto se debe determinar el valor de la coordenada en la primera componente (x) y en el segundo elemento (y) del par ordenado.

$$P_1 = \frac{\sum X_i}{\text{total de puntos ordenados}} \rightarrow \text{Punto en el eje x}$$

$$P_2 = \frac{\sum Y_i}{\text{total de puntos ordenados}} \rightarrow \text{Punto en el eje y}$$
(65)

Se toma los datos dispuestos en la Tabla 32 para la determinación del punto coincidente en la contracción.

Tabla 33

Información para hallar los puntos de intersección

Eje	Sumatoria de los puntos ordenados	Número de puntos ordenados
<i>x</i>	6,9418	4,8879
<i>y</i>	41	41

Nota. La información mostrada en la tabla indica la coordenada aproximada donde convergen los radios que conforman la contracción.

Al emplear la Ecuación (65), se obtiene que, la coordenada cartesiana de intersección es equivalente a (0,1693 ; 0,1192).

4.3.4 Cámara del Difusor

Anchura del área de entrada del difusor

Acorde a que la parte posterior de la sección de prueba está conectada a el área de entrada del difusor, dará indicio a que se conserve la misma cara geométrica, por tanto, la dimensión de anchura es igualitaria en ambos casos.

$$w_d = w_{ts} \quad (66)$$

Al emplear la anterior relación, se obtiene que: $w_d = 0,1382$ m.

Altura del área de entrada del difusor

De manera similar que, en el inciso anterior, se toma como referencia los datos de las dimensiones preexistentes que caracteriza a la sección de salida de la cámara de ensayos, y se lo relaciona con la altura de la sección delantera del difusor.

$$h_d = h_{ts} \quad (67)$$

Utilizando la relación anterior, se obtiene que: $h_d = 0,1382$ m.

Diámetro hidráulico a la entrada del difusor

Atribuyéndose de la Ecuación (5), se determina el valor del diámetro hidráulico perteneciente a el área frontal delantera de la cámara de desaceleración. La adaptación de la fórmula mencionada para este apartado, es válida, de acuerdo a que la cara geométrica del área del difusor es cuadrada.

A continuación, se toma como dato el valor de solo uno de los lados de la zona de entrada del difusor, debido a la condición de geometría que exhibe aquella cámara.

Sustitución de valores:

$$D_{hd} = \frac{4 \cdot (0,1382 \text{ m})^2}{4 \cdot 0,1382}$$

$$D_{hd} = 0,1382 \text{ m}$$

Radio hidráulico a la entrada del difusor

La determinación del radio hidráulico de la primera área que compone al difusor, está asociada con el desarrollo de la Ecuación (13).

Sustitución de valores:

Se toma como referencia el valor del diámetro hidráulico calculado en la sección anterior.

$$R_1 = \frac{0,1382 \text{ m}}{2}$$

$$R_1 = 0,0691 \text{ m}$$

Geometría de la región de salida del difusor

Para este caso, no es necesario determinar la altura y anchura del área de salida del difusor, puesto a que se trata solo de tomar en consideración el diámetro máximo que denota el ventilador, dando lugar a que la zona de salida describa una facción circular. El diámetro del dispositivo es de 0,20 metros.

Diámetro hidráulico a la salida del difusor

Dado el caso en que el perímetro de la cara posterior del cono de divergencia es circular, se deberá contar con el manejo de la siguiente formulación que se muestra próximamente, que ha sido fomentada por los escritores Çengel y Cimbala (2006), y la misma dará origen al cálculo del diámetro puesto en mención (p. 324).

$$D_h = \frac{4 \cdot \left[\pi \cdot \left(\frac{D^2}{4} \right) \right]}{\pi \cdot D} \quad (68)$$

Donde:

D_h = diámetro hidráulico para conductos circulares

D = diámetro externo del ventilador

Sustitución de valores:

Para este caso se toma como dato referencial, el diámetro máximo del ventilador (0,2 m)

$$D_{h_2} = \frac{4 \cdot \left[\pi \cdot \left(\frac{(0,2 \text{ m})^2}{4} \right) \right]}{\pi \cdot 0,2 \text{ m}}$$

$$D_{h_2} = 0,2 \text{ m}$$

Radio hidráulico a la salida del difusor

A través de la aplicación del postulado indicado en la Ecuación (14), se obtiene el radio hidráulico de la sección 2 del cono de divergencia.

Sustitución de valores:

Se considera el valor numérico del diámetro a la salida del cono de divergencia.

$$R_2 = \frac{0,2 \text{ m}}{2}$$

$$R_2 = 0,1 \text{ m}$$

Longitud del difusor

Una vez que se determine los parámetros principales que sugiere hallar la metodología para el diseño del cono de divergencia, las cuales tienen que ver con el ángulo de expansión (θ_e), los radios de las secciones del difusor (R_1 y R_2), y en algunos casos la relación entre las áreas de la sección delantera y posterior (A_R), se podrá considerar el planteamiento matemático definido en la Ecuación (15).

Reestructuración de la Ecuación (15):

Debido a que la variable que se requiere conocer, es la longitud de la cámara de desaceleración, se considera llevar a cabo el despeje de la variable en mención sobre la ecuación anteriormente citada.

Como $\arctan \approx \tan^{-1}$, entonces:

$$\theta_e = \tan^{-1} \left(\frac{R_2 - R_1}{L} \right)$$

$$\frac{\theta_e}{\tan^{-1}} = \frac{R_2 - R_1}{L}$$

$$\tan(\theta_e) = \frac{R_2 - R_1}{L}$$

$$\frac{\tan(\theta_e)}{R_2 - R_1} = \frac{1}{L}$$

$$\frac{R_2 - R_1}{\tan(\theta_e)} = L$$

Por tanto, la ecuación resultante tras la realización del despeje de la variable requerida, se adjudica como:

$$L = \frac{R_2 - R_1}{\tan(\theta_e)} \quad (69)$$

Recolección de los datos:

Generado el despeje de la variable longitud, se adjunta los datos respectivos para determinar la ampliación horizontal de la sección, pero no sin antes tomar en cuenta que, según Barlow et al. (1999) el ángulo cónico del difusor está limitado en tener una expansión pequeña, esto se realiza con la pretensión que no se cause algún efecto adverso como la separación en la capa límite (p. 81).

Tabla 34

Información para el cálculo de la longitud del cono de divergencia

Simbología	Significado	Valor	Unidad
R ₁	Radio hidráulico a la entrada del difusor	0,0691	m
R ₂	Radio hidráulico a la salida del difusor	0,1000	m
θ _e	Ángulo cónico de semi – apertura	3,5000 ^a	°

Nota. ^a El valor del ángulo radica dentro de los límites de selección común.

Sustitución de valores:

$$L = \frac{0,10 \text{ m} - 0,0691 \text{ m}}{\tan(3,5^\circ)}$$

$$L = 0,5049 \text{ m}$$

Para otros valores impartidos al ángulo cónico del difusor, se obtendría los siguientes resultados respecto a la longitud:

Tabla 35

Dimensión longitudinal de la cámara en función del ángulo

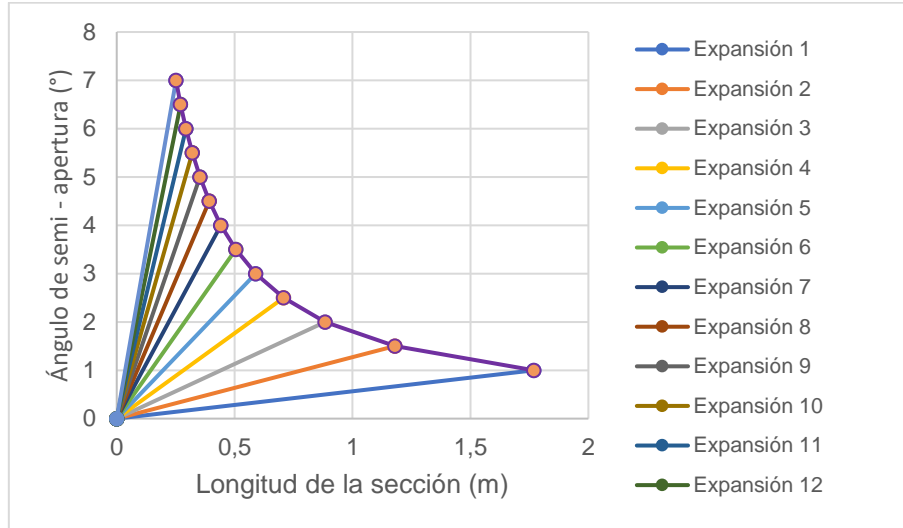
No. de relaciones	Ángulo del cono θ _e (°) ^a	Longitud L (m)
1	1,0	1,7690
2	1,5	1,1792
3	2,0	0,8842
4	2,5	0,7072
5	3,0	0,5892
6	3,5	0,5049
7	4,0	0,4416
8	4,5	0,3923
9	5,0	0,3529
10	5,5	0,3207
11	6,0	0,2938
12	6,5	0,2710
13	7,0	0,2515

Nota. ^a Se considera un rango de ángulos cónicos de hasta dos veces el valor límite de un ángulo típico (3,5°).

Por consiguiente, se representa ilustrativamente los datos adjudicados en la tabla presentada con anterioridad.

Figura 22

Longitud de desplazamiento respecto a la expansión del ángulo cónico del difusor



Nota. La distribución de líneas por efecto de la expansión del ángulo, se relaciona en primera instancia a partir de la adición de un punto de inicio, tomado como (0;0).

En la Figura 22 se percata que, si se prefiere escoger una longitud muy próxima al punto de origen, es decir, si dicha dimensión tiende a ser reducida, el ángulo llega a ser más pronunciado o con mayor expansión, por lo contrario, si la variable longitudinal crece, el ángulo cónico se acorta considerablemente.

4.3.5 Cámara de Estabilización

A lo igual que en secciones anteriores, se empezará por establecer la relación geométrica de la cámara de sedimentación con la cámara más próxima a esta.

Dimensión frontal y posterior de la cámara de sedimentación

La geometría de esta cámara tendrá las mismas características externas que la geometría que posee la región de entrada del cono convergente, en vista a que ambas secciones son continuas entre sí, por lo que, además se manejará las mismas dimensiones de ancho y alto tanto para el área delantera y posterior de la cámara decantación.

$$w_{sc} = w_c \quad (70)$$

A través de la utilización de la relación señalada con antelación, se refleja que el ancho de la cámara corresponde a: $w_{sc} = 0,3386$ m.

Y en el caso de conocer el valor de la altura, se considera la relación que se presenta en breve.

$$h_{sc} = h_c \quad (71)$$

Empleando la anterior relación, se obtiene que la altura de la cámara de estabilización es igual a: $h_{sc} = 0,3386$ m.

Diámetro hidráulico de la cámara de sedimentación

Al corroborar que los valores de ancho y altura de la cámara de decantación, tienen las mismas proporcionalidades, se puede emplear la fórmula planteada en procesos anteriores, para determinar el diámetro hidráulico de una geometría cuadrada, tal es el caso de la Ecuación (5).

Para determinar el diámetro hidráulico de la cámara de tranquilización de flujo, se considera el valor de uno de los lados de dicha sección, debido a que este presenta una geometría frontal cuadrada.

Sustitución de valores:

$$D_{h_{sc}} = \frac{4 \cdot (0,3386 \text{ m})^2}{4 \cdot 0,3386 \text{ m}}$$

$$D_{h_{sc}} = 0,3386 \text{ m}$$

4.3.6 Dispositivo de enderezamiento de flujo: Panal o Honeycomb

Se plantea instalar un panal tipo hexagonal al interior de la cámara de decantación, por tal razón es importante establecer ciertos parámetros dimensionales de diseño.

Área de la sección transversal del panal

El área del panal contendrá prácticamente la misma dimensión en cuanto al área de la cámara de decantación, ya que el honeycomb se encuentra alojada dentro de esta última. Cabe recordar a su vez que, el área de la cámara estabilizadora de flujo, es equitativa a el área de la sección de entrada de la contracción.

$$A_h = A_{sc} \approx A_h = A_c \quad (72)$$

En vinculación con la relación anterior, el área de la sección transversal del panal es igual a: $A_h = 0,1147 \text{ m}^2$.

Número de celdas del panal

Considerando los criterios propuestos para estructurar el panal de estabilización de flujo, se hace aplicación de la Ecuación (16).

Recolección de los datos:

En relación a que, las condiciones propuestas para el diseño del túnel de viento no demandan variaciones de velocidad extremadamente altas y debido a la escala o tamaño en que se configurará todo el sistema, se podría optar por seleccionar el criterio mínimo del número de celdas del panel.

Tabla 36

Información para el cálculo del número de celdas en el honeycomb

Simbología	Significado	Valor	Unidad
h_c	Número de celdas teóricas por diámetro hidráulico (según el criterio adaptado)	150	–
$D_{h_{sc}}$	Diámetro hidráulico de la cámara de estabilización	0,3386	m

Sustitución de valores:

$$n_{h_c} = 150 \text{ celdas} \cdot 0,3386$$

$$n_{h_c} = 50,7938 \text{ celdas} \approx 51 \text{ celdas}$$

Área de una celda del panel

Conociendo anteriormente el número de celdas reales que estructurarán al panel, y el área transversal de la cámara de sedimentación (que es toda el área que ocuparán o en la que se van a situar las celdas), se determina el área de una celda que integra al elemento de acondicionamiento de flujo.

$$A_{hc} = \frac{A_{sc}}{n_{hc}} \quad (73)$$

Donde:

A_{hc} = área de una celda del panel

A_{sc} = área de la cámara de estabilización

n_{hc} = número de celdas del panel

Recolección de los datos:

Tabla 37

Información para el cálculo del área de una celda del honeycomb

Simbología	Significado	Valor	Unidad
A_{sc}	Área transversal de la cámara de sedimentación	0,1147	m^2
n_{hc}	Número de celdas del panel	50,7938	–

Sustitución de valores:

$$A_{hc} = \frac{0,1447 \text{ m}^2}{50,7938 \text{ celdas}}$$

$$A_{hc} = 0,0023 \text{ m}^2 \text{ por celda}$$

Geometría de una celda del panel

De acuerdo a los aspectos que pueden adoptar las celdas del panel, los mismos que fueron mostrados en secciones anteriores (ver Figura 4), se ha decidido acogerse al de tipo hexagonal, debido a su gran número de aplicaciones en el área de diseño para túneles aerodinámicos, y sobre todo es un modelo de celda que provoca un menor coeficiente de pérdida.

De primer momento se pretende buscar la dimensión de uno de los seis lados que forman la celda hexagonal, para ello se centra en la operación matemática que define el cálculo del área de un polígono hexagonal regular, la cual se cita a continuación (Barbero Corral et al., 2012, p. 148).

$$A = \frac{P \cdot ap}{2} \quad (74)$$

Donde:

P = perímetro hexágono regular

ap = apotema del polígono regular

Respecto a la Ecuación (74), se considera que el perímetro de un hexágono se define de la manera siguiente (Colera et al., 2011, p. 93):

$$P = l \cdot n_l \quad (75)$$

Donde:

l = lado del polígono hexagonal

n_l = número de lados del hexágono

Para el caso de delimitar la apotema de un polígono regular, se lo puede determinar en base a (Editorial Don Bosco, 2016, p. 231):

$$ap = \frac{l}{2 \cdot \tan(\theta)} \quad (76)$$

Donde:

ap = apotema del polígono regular

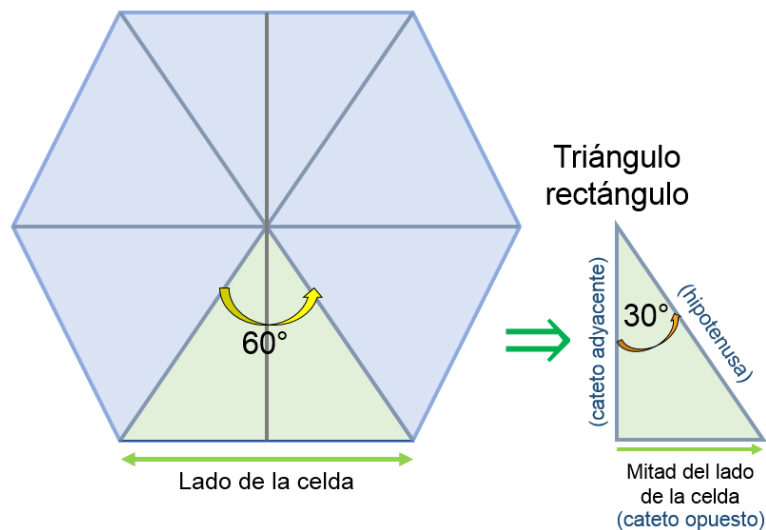
l = lado del hexágono

θ = ángulo medio

La Ecuación (76) se proyecta en relación a la descomposición de los lados del polígono hexagonal en triángulos rectángulos, junto con la aplicación de la razón trigonométrica, por lo que, es importante mencionar que el ángulo a emplear en dicha formulación, es equivalente a la mitad del ángulo central del polígono (ver Figura 23).

Figura 23

Trigonometría del polígono hexagonal regular



Nota. La ilustración demuestra la aplicación de una función trigonométrica al descomponer el polígono regular por el criterio del triángulo rectángulo.

Posteriormente, se agrupa las anteriores ecuaciones descritas, para formar la fórmula general en relación al área del polígono.

$$A = \frac{l \cdot n_l \cdot \left\{ \frac{l}{[2 \cdot \tan(\theta)]} \right\}}{2} \quad (77)$$

De la Ecuación (77), se elabora el despeje de la variable solicitada inicialmente, la misma que tiene que ver con el lado del hexágono.

$$A = \frac{l \cdot n_l \cdot \frac{1}{2} \cdot l \cdot \frac{1}{\tan(\theta)}}{2}$$

$$2 \cdot A = l \cdot n_l \cdot \frac{1}{2} \cdot l \cdot \frac{1}{\tan(\theta)}$$

$$2 \cdot 2 \cdot A = l \cdot n_1 \cdot l \cdot \frac{1}{\tan(\theta)}$$

$$\frac{4 \cdot A}{n_1} = l \cdot l \cdot \frac{1}{\tan(\theta)}$$

$$\frac{4 \cdot A \cdot \tan(\theta)}{n_1} = l^2$$

$$\sqrt{\frac{4 \cdot A \cdot \tan(\theta)}{n_1}} = l$$

Por lo que, la ecuación que permitirá determinar directamente cualesquiera de los lados que crean la silueta del hexágono, se interpreta de la siguiente manera:

$$l = \sqrt{\frac{4 \cdot A \cdot \tan(\theta)}{n_1}} \quad (78)$$

Recolección de los datos para la aplicación de la Ecuación (78):

Tabla 38

Información para el cálculo de uno de los lados del honeycomb

Simbología	Significado	Valor	Unidad
A_{hc}	Área del polígono regular (área de una celda del panel)	0,0023	m^2
θ	Mitad de un ángulo central	30^a	$^\circ$
n_1	Número de lados del hexágono regular	6	—

Nota. ^a Un ángulo central equivale a 60° , la mitad de un ángulo central puede ser obtenida también mediante la división de 360° (totalidad de grados de la figura) entre 2 que multiplica al número de lados del polígono regular (es decir $360^\circ / (2 \cdot n_1)$).

Sustitución de valores:

$$l_{hc} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,023 \text{ m}^2 \cdot \tan(30^\circ)}{6}}$$

$$l_{hc} = 0,0295 \text{ m}$$

La altura de una celda del panel, puede ser hallada mediante el uso de la operación siguiente.

$$h_{hc} = 2 \cdot l \cdot \cos(\theta) \quad (79)$$

Donde:

l = lado del polígono regular

θ = ángulo medio del ángulo interno

Recolección de los datos para aplicación de la Ecuación (79):

Tabla 39

Información para el cálculo de la altura de una celda del honeycomb

Simbología	Significado	Valor	Unidad
l	Lado del hexágono regular	0,0295	m
θ	Mitad del ángulo central de un lado del polígono	30 ^a	°

Nota. ^a El ángulo ha sido dispuesto en base al criterio de la descomposición del hexágono por triángulos rectángulos.

Sustitución de valores:

$$h_{hc} = 2 \cdot 0,0295 \text{ m} \cdot \cos(30^\circ)$$

$$h_{hc} = 0,0511 \text{ m}$$

El diámetro máximo al que está circunscrito una celda del panel, es determinada al multiplicar dos veces el lado de dicha celda ($d_{hc} = 2 \cdot l$), por lo tanto, para el presente caso en específico, el diámetro es igual a $D_{hc} = 0,0590 \text{ m}$.

En la siguiente Tabla 40, se presenta los datos ya determinados respecto a una de las celdas del panel, junto a otras características propias de un polígono regular de seis lados.

Tabla 40

Características de una celda del panel

Simbología	Significado	Valor	Unidad
Área	A_{hc}	0,0023	m ²
Lado	l_{hc}	0,0295	m
Altura	h_{hc}	0,0511	m
Apotema	ap_{hc}	0,0255	m
Diámetro mayor circunscrito	D_{hc}	0,0590	m
Diámetro menor circunscrito	d_{hc}	0,0511	m
Radio máximo o circunradio	R_{hc}	0,0295	m

Diámetro hidráulico de la celda del panel

De acuerdo al aspecto poligonal que exhibe la celda del tipo de panel seleccionado, su diámetro hidráulico es calculado mediante la adjudicación de la Ecuación (17), donde se considera el valor del diámetro mayor habiente entre los extremos internos de separación más prolongada en el polígono hexagonal regular.

Sustitución de valores:

$$D_{h_{hc}} = 0,0590 \text{ m} \cdot \sqrt{\frac{6}{\pi \cdot \sqrt{3}}}$$

$$D_{h_{hc}} = 0,0619 \text{ m}$$

Longitud del panel en sentido de la corriente

Con la aplicación de la Ecuación (18), se adquiere la longitud correspondiente al panel o honeycomb, pero antes de ello, se debe tomar la siguiente consideración.

Reestructuración de la Ecuación (18):

Se realiza el despeje de la variable de la longitud del panel sobre la Ecuación (18).

$$l_h = D_{h_{hc}} \cdot l_h : D_{h_{hc}} \quad (80)$$

Recolección de los datos:

Tabla 41

Información para el cálculo de la longitud del honeycomb

Simbología	Significado	Valor	Unidad
$D_{h_{hc}}$	Diámetro hidráulico de la celda del panel	0,0619	m
$l_h : D_{h_{hc}}$	Relación de la longitud y diámetro hidráulico	6 ^a	—

Nota. ^a Representa al valor de la relación mínima respecto al rango seleccionable.

Sustitución de valores:

$$l_h = 0,0619 \text{ m} \cdot 6$$

$$l_h = 0,3714 \text{ m}$$

Porosidad del panel

En virtud de la Ecuación (19), se efectúa el desarrollo pertinente para la obtención del nivel de porosidad que ostenta el dispositivo de estabilización de flujo.

Recolección de los datos:

Tabla 42

Información para el cálculo de la porosidad del honeycomb

Simbología	Significado	Valor	Unidad
Ω_f	Área transversal real del flujo	0,1146671324 ^a	m ²
Ω_t	Área transversal total del panel	0,115 ^b	m ²

Nota. ^a Se exhorta a tomar la gran mayoría de los valores numéricos que componen la parte decimal. ^b Se ha tomado 3 dígitos decimales, por motivo de que esta condición será similar a la que se implementará en la etapa de diseño.

Sustitución de valores:

$$\beta_h = \frac{0,1146671324 \text{ m}^2}{0,115 \text{ m}^2}$$

$$\beta_h = 0,9971$$

4.3.7 Comparativa de criterios

Tipo de túnel de viento según las características de la cámara de prueba

En cuanto a la proporción del área de la cámara de ensayos, los investigadores Bell y Mehta (1988), establecen que: “Si A_{ts} es menor a $0,5 \text{ m}^2$, el túnel aerodinámico es de tipo subsónico o de baja velocidad” (p. 4).

Conociendo la dimensión del área de la sección de ensayos, se desarrolla la evaluación de la teoría, cuyo resultado evaluativo se muestra en la tabla más próxima.

Tabla 43

Caracterización del túnel de viento según el área de la cámara de ensayos

	Magnitud del área transversal	Criterio de análisis	Condición	Características según condición
Región de entrada	0,01911 m^2	$A_{ts} > 0 \text{ m}^2$ $A_{ts} < 0,5 \text{ m}^2$	El criterio se satisface o se acepta.	El túnel de viento es de pequeña escala (es decir, cuenta con una escala por reducción).
Región de salida	0,01911 m^2			El túnel de viento posee una baja velocidad (subsónico).

Respecto a la Tabla 43, se señala que se cumple el criterio planteado por los investigadores.

Relación de área en el difusor

En virtud a lo señalado por Barlow et al. (1999), se evalúa lo siguiente, respecto a la relación de áreas entre la sección 1 y sección 2 ($A_R = A_2/A_1$) del cono de desaceleración (p. 68).

Tabla 44

Característica de la relación de área del difusor

	Magnitud del área	Criterio de análisis	Condición	Características según condición
Región de entrada	0,01911 m^2	$A_R \geq 2$ $A_R \leq 3$	La relación de área ($A_R = 1,6438$) es ligeramente inferior a los valores típicos	El difusor tiene un aspecto cercano a las relaciones de áreas pequeñas deseables
Región de salida	0,0314 m^2			

4.4 Aplicación de la metodología de cálculo numérico mediante un software de carácter matemático basado en matrices

Por medio de la aplicación del software Matlab R2022b (licencia educacional), se genera las codificaciones respectivas en relación al diseño del dimensionamiento de los componentes del prototipo aerodinámico.

4.4.1 Perfil lateral de la contracción seccionado horizontalmente

A continuación, se establece la estructura a seguir para el llenado de datos sobre la ventana de comandos de Matlab.

Tabla 45

Especificaciones de las componentes de la codificación para el registro de sus datos

Asunto	No. de línea	Variable		Descripción	Valor (m)	
		Denominación	Representación			
Declaración de los datos	3	Altura parcial a la entrada de la contracción	H_i	Corresponde al punto de la altura máxima existente en la contracción.	0,1693	
	4	Altura parcial a la salida de la contracción	H_e	Equivalente al punto mínimo respecto a la altura de la tobera.	0,0691	
	5	Longitud total en sentido de la corriente de la contracción	L	Relaciona la extensión longitudinal total habiente entre la sección 1 y 2 de la cámara.	0,3386	
			1er dígito del intervalo cerrado	x_1	Punto de inicio o de partida del eje de las abscisas, también referida como límite inferior del conjunto de datos.	0,0000
	6	2do dígito del intervalo cerrado	x_2	Distancia entre dos puntos consecutivos del eje x (separación entre coordenadas).	0,0084656 ^a	
			3er dígito del intervalo cerrado	x_3	Punto de llegada o límite superior del eje horizontal, conocida también como la longitud total de la cámara de contracción.	0,3386

Nota. ^a El punto intermedio del intervalo $x(x_2)$ se compone de siete números decimales para lograr una mejor precisión en el trazado de cada punto que constituye al perfil de la contracción.

Tabla 46

Otros componentes del script

Tipo	Sintaxis o Expresión	Descripción
Comando	plot	Devuelve la representación gráfica bidimensional de una serie de puntos agrupados.
Función	Title	Muestra el título asignado a la gráfica resultante.
Función	xlabel	Permite la creación de una etiqueta en el eje X sobre la gráfica.
Función	ylabel	Permite la creación de una etiqueta en el eje Y sobre la gráfica.
Comando	grid on	Traza una red de líneas de cuadrícula por detrás de la representación del gráfico para mejorar la interpretación de los datos.

Tomado de: (The MathWorks Inc., s.f.)

Al direccionarse al espacio de trabajo o Workspace, se puede conocer toda la información concerniente a la altura encontrada respecto a la distribución por puntos que hayan sido encomendados.

Figura 24

Extracto de la codificación para el cálculo de la función polinomial

```
>> %Perfil parcial de lateral de la Contracción mediante función polinomial
%Declaración de los datos%
H_i=0.1693;
H_e=0.0691;
L=0.3386;
x= 0:0.008465:0.3386;
%Asignación de la ecuación polinómica de 5to grado para procesamiento%
H=H_i-(H_i-H_e)*(((6/(L^5))*x.^5)-((15/(L^4))*x.^4)+((10/(L^3))*x.^3));
%Estructuración para la visualización del resultado ilustrativo%
plot (x,H,'b')
title ('Perfil lateral del Cono de Contracción')
xlabel ('Longitud de la Contracción (L) en metros')
ylabel ('Altura fragmentada de la Contracción (H) en metros')
grid on
```

%Autor(es): Yépez Andagana

Nota. La función *x., permite considerar el cálculo para toda la serie de datos definidos mediante el intervalo x. El script de la codificación se encuentra disponible en el Anexo 3.

4.4.2 Longitud del difusor en función al ángulo de expansión cónico de semi – apertura

Tabla 47

Componentes de modificación para el cálculo de la longitud del difusor

Asunto	No. de línea	Variable		Descripción	Valor (m)
		Denominación	Representación		
Declaración de los datos	3	Radio hidráulico de entrada	R ₁	Señala el valor del radio de la primera sección o región delantera de la cámara de desaceleración	0,0691
	4	Radio hidráulico de salida	R ₂	Referente a la dimensión del radio de la segunda sección del difusor, o lo que es equivalente al diámetro del ventilador.	0,1000
	5	1er componente (límite del intervalo)	L _{x1}	Representa el extremo inferior sobre la cual se empezará a tabular los datos resultantes.	0,0000
		2do componente del intervalo	L _{x2}	Define la separación o tamaño del paso que existirá entre cada dato que sea tomado.	0,5000
		3er componente (límite del intervalo)	L _{x3}	Asimila el extremo máximo donde concluirá	5,0000

Cabe manifestar que el resultado que se obtenga tras la operación matemática empleada para el cálculo de la longitud del difusor vs el ángulo cónico, deberá manejarse en grados, por lo que es necesario que dicha operación esté acompañada por la multiplicación de la siguiente componente: $180/\pi$.

Figura 25

Extracto de la codificación para el cálculo de longitud del difusor respecto al ángulo de semi – apertura

```
>> %Cálculo de la longitud en relación al ángulo de cono para el Difusor
%Declaración de los datos
R1=0.0691;
R2=0.1;
L=0: 0.05: 5;

%Asignación de la operación matemática
Angle=(atan((R2-R1)./L))*(180/pi);

%Congiguración de la presentación de los resultados mediante tabla
table=[L;Angle];
fprintf('%7.2f %7.2f \n', table)
vpa(table,4)

%Estructura de la representación gráfica
y=rand(5,0);
bar(y)
grid on
ax = gca;
ax.GridColor = [0 .5 .5];
ax.GridLineStyle='--';

title('Dimensión longtiudinal en función del ángulo cónico')
xlabel('Longtiud del difusor (L_d)')
ylabel('Ángulo de expansión de semi - apertura ( $\theta_e$ )')
hold on
area(L,Angle);
hold off

%Autor(es): Yépez Andagana
```

Nota. Se muestra el script digitalizado de la codificación en el Anexo 3.

4.5 Aplicación de la metodología de diseño y manufacturación 3D

4.5.1 Diseño de elementos

En la siguiente Tabla 48, se presenta la estructura de mayor utilización en el entorno de la investigación y del ámbito estudiantil, que toma en consideración las características de flujo circulante en el túnel de viento:

Tabla 48

Estructura del túnel de viento planteado

Característica	Configuración
Tipo de circuito	Abierto (Tipo NPL)
Configuración de retorno	Sin retorno
Modo de circulación del flujo	Intermitente a presión
Tipo de sección de la cámara de ensayo	Cerrada
Dirección de Flujo	Horizontal (Unidireccional)
Característica de Flujo	Subsónico
Rango de velocidad de operación en relación al Número de Mach	Ma<0,3

Tomado de: (Barlow et al., 1999)

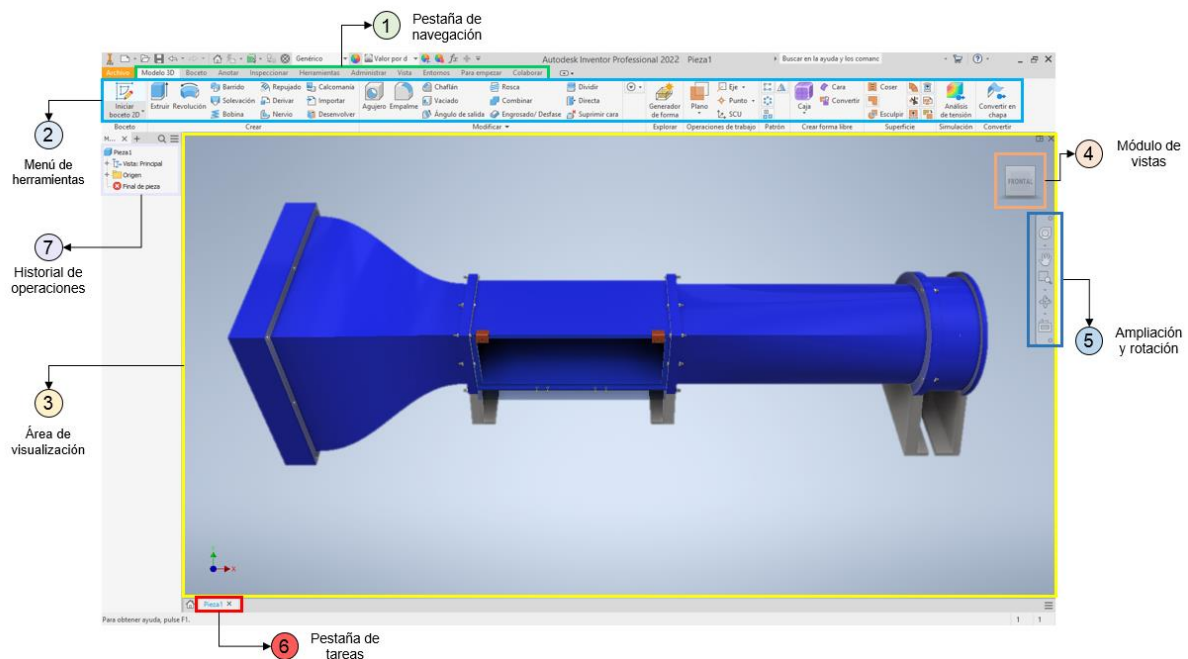
Autodesk Inventor

El programa de diseño asistido por computador aplicado para la creación de los objetos del túnel, pertenece a la familia Autodesk con su paquete Inventor 2020. Las partes de su interface pueden verse en la Figura 26.

1. Menú: integra herramientas de modelado, examinación, entorno, simulación y sistema de configuraciones del software.
2. Propiedades: indica todas las particularidades que fueron utilizadas para la creación del modelo 3D, en general, puede denominarse como el historial de diseño.
3. Área de visualización: posibilita observar el modelado de la pieza o conjunto.
4. Módulo de vistas: representa las aristas disponibles para la visualización del objeto, donde la marcación que tiene una tonalidad profunda del todo el volumen del cubo, establece la vista que está manejando el usuario en aquel momento.
5. Ampliación: permite seccionar y mover de manera visual, cierta parte de interés del modelo.
6. Pestaña: refleja las pestañas abiertas, tanto en segundo plano y la actual que el usuario está utilizando.

Figura 26

Interfaz del software Autodesk Inventor



4.5.2 Construcción de la maqueta

Laminador tridimensional

Al concluir la etapa de planeación de los elementos a través del programa de diseño asistido, surge la fase de laminación o *slicing*, por el cual es necesario recurrir a un gestor de modelos en tercera dimensión que posibilite conferir características a los sólidos a imprimirse.

Cura Ultimaker brinda una licencia abierta, en el área de la impresión tridimensional sin restricciones al usuario, y diversas particularidades de configuración.

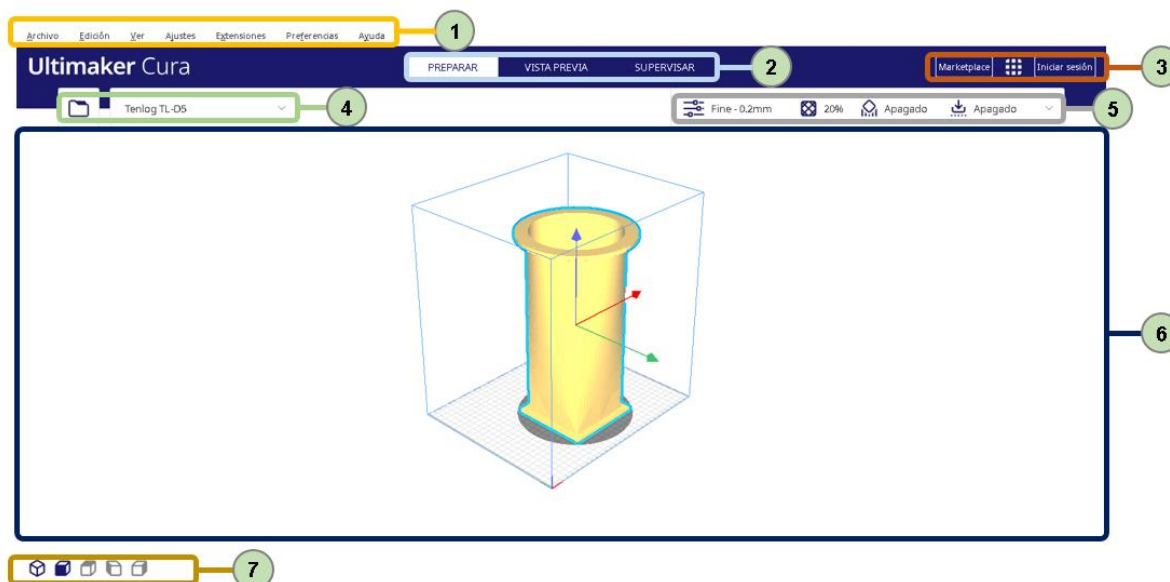
El programa exhibe las siguientes partes y/o herramientas vistas en la Figura 27.

1. Menú: está integrado por las opciones generales que darán paso a otras configuraciones más específicas, tales como importar y exportar el objeto modelado, perspectiva del plano de visualización, modificación del código-G, organizar preferencias del programa, entre otras.
2. Panel de visualización: dispone de tres formas de enfoque que son, preparar, vista previa y supervisar. Las dos primeras formas de visión hacen énfasis al formato de la pieza antes y después de que haya sido configurado, mientras que la última forma de enfoque asiste al usuario para controlar de forma remota la impresora vía puerto USB o mediante protocolo de internet (IP).
3. Inicio de sección y complementos: el usuario podrá digitalizar las credenciales de su cuenta para ingresar a la plataforma Cura, aunque no es necesario iniciar sesión para desbloquear sus funciones.
4. Importar y selección de impresora 3D: corresponde a un acceso rápido para importación del objeto al programa y la selección de la máquina 3D que dispone el usuario para la impresión del objeto a un estado físico.
5. Ajuste de impresión: permite confeccionar el perfil del objeto a imprimirse y el material a utilizar.
6. Área de visión: la pieza ingresada al programa podrá visualizar en esta área y que posterior al ajuste del mismo, dará paso al cuadro de laminación que mostrará la respectiva duración y magnitud de material necesario para la producción del objeto.

7. Perspectiva de visualización: muestran los planos de visualización, siendo estos, frontal, superior y laterales.

Figura 27

Interfaz gráfica de Cura Ultimaker



En la Tabla 129, adjuntado en la sección de anexos (ver Anexo 5) instaura las características generales del laminador.

Propiedades de elementos 3D

Los objetos que componen el túnel, dispondrán propiedades atípicas que difieren de acuerdo a la funcionalidad y dimensionamiento. En las siguientes tablas, se especifican las generalidades para cada componente con su respectiva ilustración.

Cabe indicarse que al seleccionar cualquier de los tres tipos de adherencia, que ofrece el programa Cura Ultimaker dentro de su gama de ajustes de impresión, las subsiguientes opciones aparecerán de acuerdo a aquella selección como lo muestra la Tabla 49.

Tabla 49

Visualización de opciones según tipo de adherencia

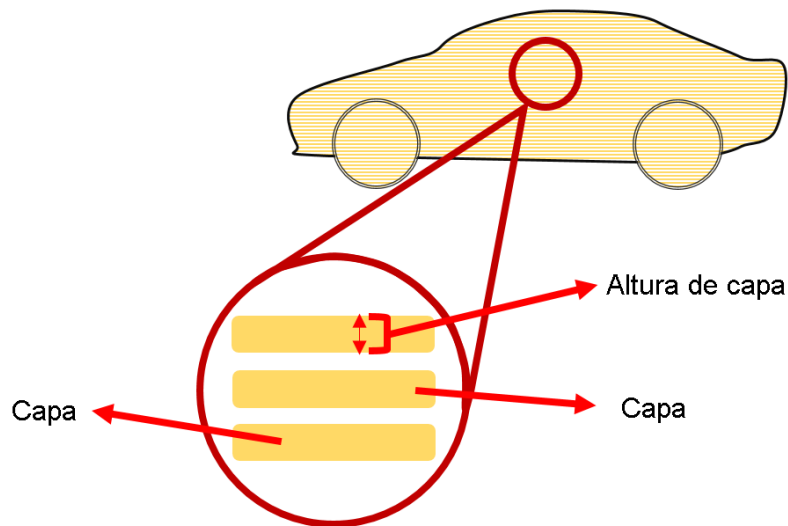
Tipos de adherencia	Opción		
	Recuento de líneas	Ancho del borde	Borde exterior
Ninguno			
Balsa			
Falda	*		
Borde	*	*	*

Nota. El carácter de estrella o asterisco (*) indica las opciones visibles que son habilitadas por el software Cura al momento de seleccionar el tipo de adherencia requerido.

La altura de capa es un factor que intercepta directamente en el acabado de la pieza, entre menor sea este valor (dado en unidad de milímetros), mayor precisión y calidad tendrá el objeto impreso. Esta condición es obligatoria en piezas de baja proporción y que requieran exactitud en su terminado, como fue manifestado al inicio de este párrafo.

Figura 28

Altura de capa



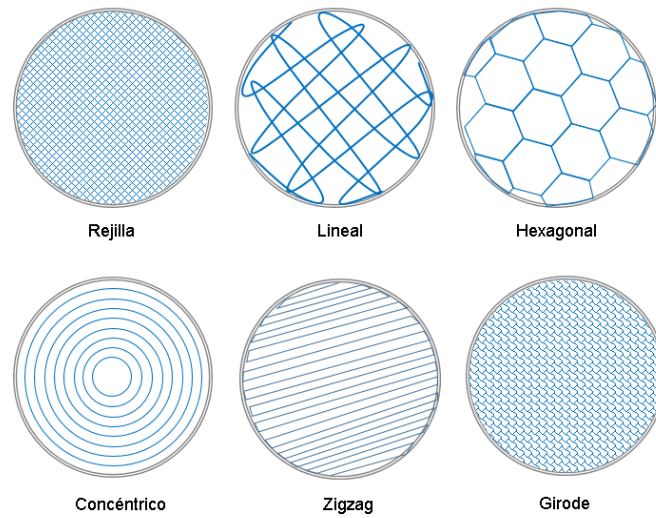
Nota. La altura de capa establece el grosor del revestimiento de la capa depositada por la boquilla del extrusor.

En la construcción de los objetos del túnel, la altura de capa definida oscila entre 0,2 y 0,3 mm, siendo un valor considerable por la magnitud de la misma, debido a que un valor menor conllevará a mayor tiempo y consumo de material para la impresión.

La recomendación para evitar imprecisiones en las piezas, debido a que estas deberán ser montables y sujetas por medio de tornillos, está en manejar tolerancias en el diseño de las brechas o espacios requeridos, por ello la tolerancia utilizada ha sido de $\pm 0,5$ milímetros.

El relleno dentro la impresión tridimensional está dividido en dos partes principales, que son, patrón y porcentaje de relleno. Un patrón de relleno trasluce el tipo de estructura que conforma al objeto, que dependiendo de su elección posibilita otorgar rigidez.

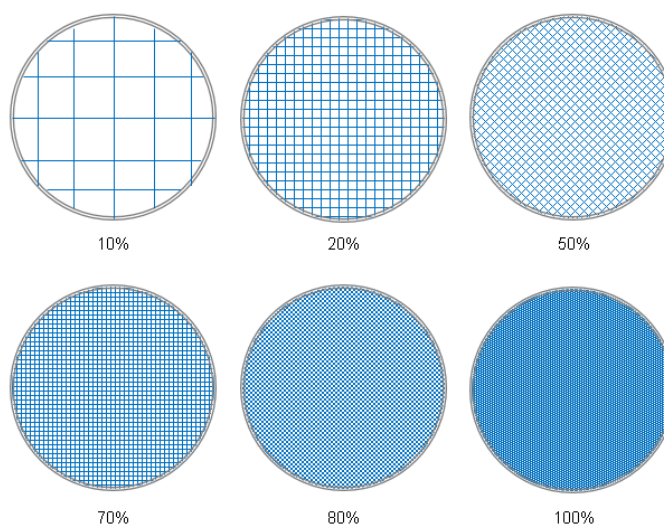
Cura Ultimaker ofrece doce clases de patrones para rellenar el sólido, visto en la sección de anexos (ver Tabla 130), aunque existen demás clases que variarán en función del laminador a emplear. De manera selectiva, en la Figura 29 puede visualizarse los patrones de relleno. Para efectos de impresión, el patrón optado para embutir el sólido pertenece a la clase lineal.

Figura 29*Representación de patrones de relleno*

Nota. La gráfica muestra un fragmento de todas las clases de patrones disponibles en el programa Cura Ultimaker.

El porcentaje de relleno relaciona la intensidad de material asentado en el objeto, los valores fluctúan entre el 0 al 100%, donde el primero delimita que la pieza está vacía o hueca, mientras que el segundo, 100%, precisa que el objeto está cubierto en su totalidad de filamento, concediendo mayor resistencia.

La Figura 30 guía de forma didáctica la amplitud de los diferentes porcentajes de relleno, no obstante, el valor puede cambiar de acuerdo al criterio del fabricante.

Figura 30*Porcentaje de relleno relativo*

Nota. La gráfica indica ciertos valores elegibles, pero podrá ser modificado al gusto del usuario, siempre que esté dentro del campo numérico admisible.

La velocidad de impresión es otra variable relevante a tomar en consideración dentro del aspecto de ajuste, puesto a que, esta incide en el terminado final del objeto. Por tanto, la elección determinada de velocidad utilizada para los objetos fluctúa entre 30 a 40 mm/s.

Tabla 50

Propiedades de impresión para el objeto de contracción

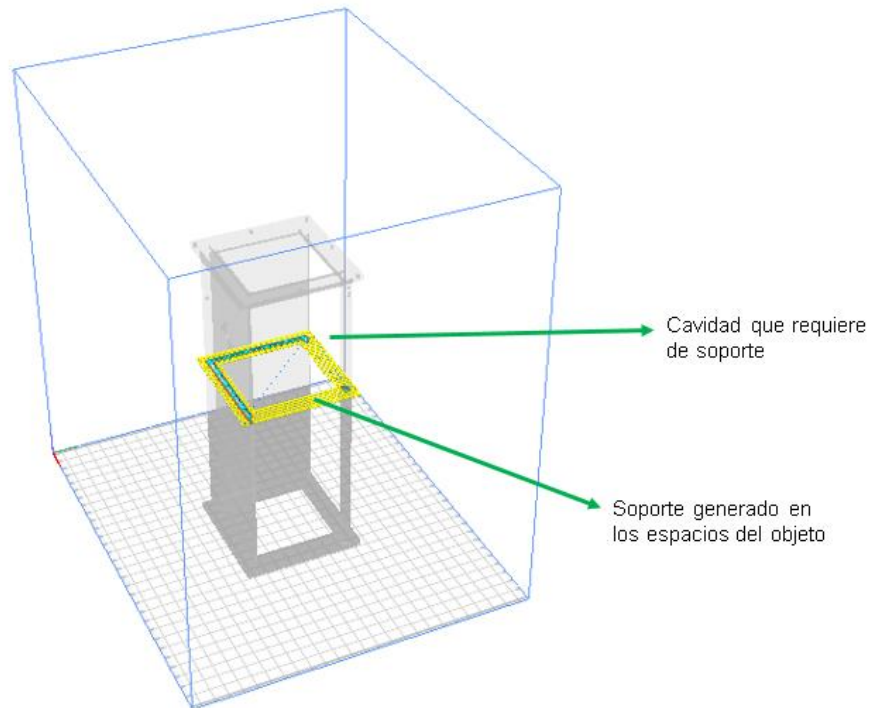
Parámetro	Condición	Valor	Unidad
Calidad			
Altura de capa		0,2	mm
Altura de capa inicial		0,15	mm
Ancho de línea de pared		0,3	mm
Paredes			
Recuento de líneas de pared		2	
Expansión horizontal		0,0	mm
Relleno			
Densidad de relleno		20%	
Distancia de línea de relleno		3	mm
Patrón de relleno	Lineal		
Grosor de capa de relleno		0,3	mm
Material			
Temperatura del extrusor		210	° C
Temperatura del extrusor para la capa inicial		215	° C
Temperatura de cama de impresión		70	° C
Temperatura de cama de impresión para la capa inicial		75	° C
Velocidad			
Velocidad de relleno		40	mm/s
Velocidad del soporte		30	mm/s
Velocidad de desplazamiento		60	mm/s
Velocidad de la capa inicial		20	mm/s
Velocidad de falda / borde		25	mm/s
Desplazamiento			
Retracción	Habilitado		
Distancia de retracción		3	mm
Velocidad de retracción		30	mm/s
Salto en Z en la retracción	Habilitado		
Altura de salto en Z		0,2	mm/s
Refrigeración			
Enfriamiento en todo el ciclo de impresión	Habilitado		
Velocidad del ventilador		100%	
Soporte			
Generación de soporte	Habilitado		
Estructura de soporte	Normal		
Ubicación del soporte	En todos sitios		
Ángulo de voladizo para soporte		45	°
Patrón del soporte	Lineal		
Densidad del soporte		15%	
Grosor de la capa de relleno del soporte		0,3	mm
Techo de soporte	Deshabilitado		
Adherencia			
Tipo de adherencia	Balsa		
Ancho del borde			
Recuento de líneas			

A través de la implementación del software Autodesk Meshmixer, de licencia libre, se procede a efectuar un corte por la mitad para el elemento de la cámara de ensayos. Este corte permite minimizar el volumen de soporte que llega a generar la pieza no dividida u original.

La reducción de soporte facilita que la impresión del objeto pueda finalizar con mayor rapidez y ahorrar material, en comparación a la pieza original que requiere del soporte.

Figura 31

Soporte originado en sólido sin cortes



Nota. El soporte es generado en las cavidades o espacios del objeto que posterior a esto darán apoyo a las capas de filamento expulsados por la boquilla.

Tabla 51*Perfil de ajuste para la cámara de ensayo*

Parámetro	Condición	Valor	Unidad
Calidad			
Altura de capa		0,3	mm
Altura de capa inicial		0,2	mm
Ancho de línea de pared		0,3	mm
Paredes			
Recuento de líneas de pared		2	
Expansión horizontal		0,0	mm
Relleno			
Densidad de relleno		25%	
Distancia de línea de relleno		3	mm
Patrón de relleno	Lineal		
Grosor de capa de relleno		0,3	mm
Material			
Temperatura del extrusor		210	° C
Temperatura del extrusor para la capa inicial		215	° C
Temperatura de cama de impresión		70	° C
Temperatura de cama de impresión para la capa inicial		75	° C
Velocidad			
Velocidad de relleno		40	mm/s
Velocidad del soporte		30	mm/s
Velocidad de desplazamiento		60	mm/s
Velocidad de la capa inicial		20	mm/s
Velocidad de falda / borde		25	mm/s
Desplazamiento			
Retracción	Habilitado		
Distancia de retracción		3	mm
Velocidad de retracción		30	mm/s
Salto en Z en la retracción	Habilitado		
Altura de salto en Z		0,2	mm/s
Refrigeración			
Enfriamiento en todo el ciclo de impresión	Habilitado		
Velocidad del ventilador		100%	
Soporte			
Generación de soporte	Habilitado		
Estructura de soporte	Normal		
Ubicación del soporte	En todos sitios		
Ángulo de voladizo para soporte		45	°
Patrón del soporte	Lineal		
Densidad del soporte		10%	
Grosor de la capa de relleno del soporte		0,3	mm
Techo de soporte	Deshabilitado		
Adherencia			
Tipo de adherencia	Borde		
Ancho del borde		8	mm
Recuento de líneas		17	

Nota. Esta configuración, presentada en la tabla, fue adjudicada para los dos elementos seccionados por la mitad.

Tabla 52*Perfiles de impresión del difusor*

Parámetro	Condición	Valor	Unidad
Calidad			
Altura de capa		0,3	mm
Altura de capa inicial		0,2	mm
Ancho de línea de pared		0,4	mm
Paredes			
Recuento de líneas de pared		4	
Expansión horizontal		0,2	mm
Relleno			
Densidad de relleno		20%	
Distancia de línea de relleno		3	mm
Patrón de relleno	Lineal		
Grosor de capa de relleno		0,3	mm
Material			
Temperatura del extrusor		210	° C
Temperatura del extrusor para la capa inicial		215	° C
Temperatura de cama de impresión		70	° C
Temperatura de cama de impresión para la capa inicial		75	° C
Velocidad			
Velocidad de relleno		30	mm/s
Velocidad del soporte		30	mm/s
Velocidad de desplazamiento		50	mm/s
Velocidad de la capa inicial		20	mm/s
Velocidad de falda / borde		25	mm/s
Desplazamiento			
Retracción	Habilitado		
Distancia de retracción		5	mm
Velocidad de retracción		25	mm/s
Salto en Z en la retracción	Habilitado		
Altura de salto en Z		0,3	mm/s
Refrigeración			
Enfriamiento en todo el ciclo de impresión	Habilitado		
Velocidad del ventilador		100%	
Soporte			
Generación de soporte	Habilitado		
Estructura de soporte	Normal		
Ubicación del soporte	En todos sitios		
Ángulo de voladizo para soporte		45	°
Patrón del soporte	Lineal		
Densidad del soporte		15%	
Grosor de la capa de relleno del soporte		0,3	mm
Techo de soporte	Deshabilitado		
Adherencia			
Tipo de adherencia	Falda		
Ancho del borde			
Recuento de líneas		3	

Nota. El difusor del túnel, al tener una geometría cónica necesita que la propiedad de velocidad del extrusor sea la más baja posible para imprimirse, debido a que la banda tensora del eje x de la impresora tiende a esforzarse para este tipo de geometría, por el cual origina que el objeto pierda dicha forma característica.

La Tabla 53 indica la cantidad de material y duración en minutos, dado en una estructura teórica y real, que ha requerido el componente para llegar a su construcción física.

Tabla 53*Comparación de fabricación de piezas*

Elementos	Teórico		Real	
	Duración (horas)	Material (gramos)	Duración (horas)	Material (gramos)
Cámara estabilizadora	41,20	180,60	42,59	185,18
Contracción	172,26	1849,44	175,19	1862,28
Cubículo de pruebas	48,45	905,28	49,71	910,73
Difusor	81,12	1512,60	82,36	1514,20
Vehículo de estudio	22,30	238,24	23,45	242,08

Materiales e instrumentos de impresión

Para dar espacio a la obtención física de los sólidos, es sustancial señalar las características que propicia la impresora 3D y el material de ácido poliláctico o PLA.

Según el fabricante del filamento PLA sostiene la siguiente información del producto mostrada en la Tabla 54.

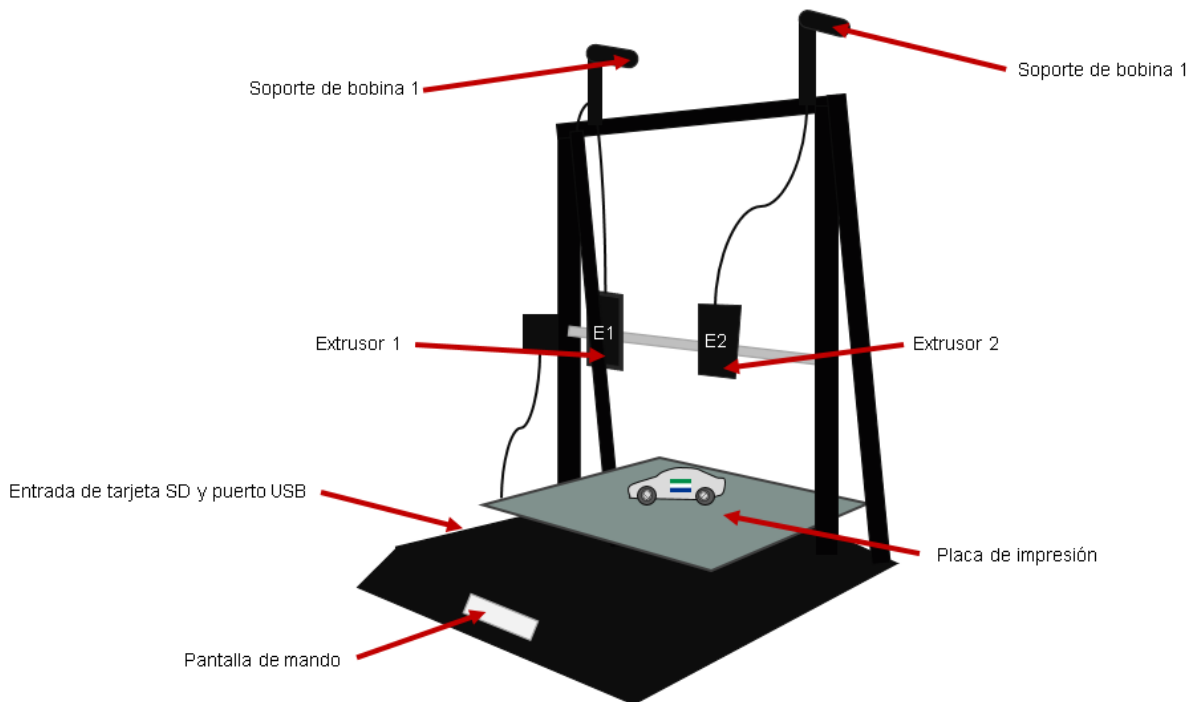
Tabla 54*Propiedades del material PLA*

Asignación	Propiedad
Material	Ácido poliláctico
Marca	Genérica
Rango térmico del extrusor	190 a 220 ° C
Rango térmico de la placa	60 a 80 ° C
Diámetro	1,75 mm
Precisión dimensional	+/- 0,02 mm
Resistencia termal	≤ 40 ° C
Peso	1000 g

La máquina tridimensional, aplicada para la impronta de piezas, expone la ficha técnica impuesta en la sección de anexos (ver Tabla 131), mientras que en la Figura 32 ostenta sus elementos principales.

Figura 32

Partes generales de la impresora Tenlog TL-D5



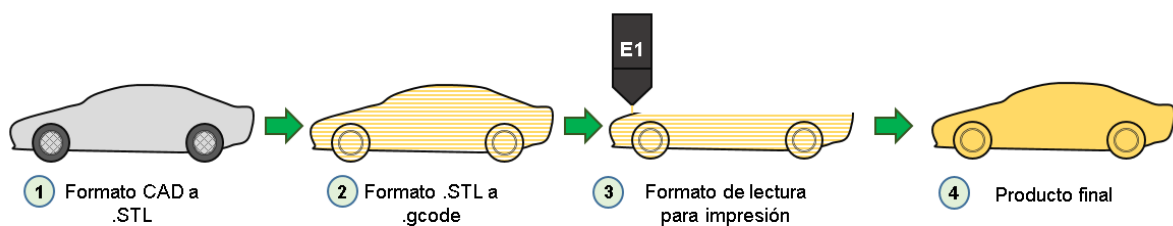
Nota. La pantalla de la impresora TL-D5 mostrará un cuadro de reanudación o recuperación de impresión ante posibles cortes de energía, aun así, la prolongación de la fuente eléctrica puede afectar la adherencia del objeto.

Impresión 3D

En la Figura 33, se exhibe la secuencia de impresión.

Figura 33

Secuencia de impresión del sólido



Nota. El formato estereolitográfico del acrónimo STL, visualizado en la figura, es el archivo más utilizado para la fabricación tridimensional, aunque existen demás formatos de lectura que dependerá de la compatibilidad del programa laminador.

4.6 Aplicación de la metodología de programación

Gestión de código para recepción de datos

La gestión de códigos del presente proyecto está fragmentada en dos secciones, por una parte hace énfasis a la base de código para la captación de datos que será elaborado mediante el software IDE Arduino, de adquisición gratuita, mientras que la posterior parte es complementada mediante Microsoft Visual Studio que permitirá visualizar los datos sintonizados.

IDE Arduino

La plataforma Arduino IDE del inglés Integrated Development Enviroment, que refiere al Entorno de Desarrollo Integrado, admite focalizar las creaciones de sketch o archivo de código mediante el editor de texto para dar funcionalidad a la placa microcontroladora a través de la ejecución de diversas actividades que fueron diseñadas en el archivo de diseño.

La Tabla 12 muestra las características generales de la plataforma que en la actualidad su obtención es gratuita a través de su página autorizada y está disponible para los sistemas operativos de Windows, Mac OS X y Linux.

Tabla 55

Características principales del IDE Arduino

Propiedades	Detalles
Software	IDE Arduino
Versión	2.0.3
Sistemas Operativos	Windows, Mac OS X y Linux
Arquitectura	64 bits
Licencia	Gratuita
Enlace de descarga	https://www.arduino.cc/en/software
Entorno de programación	http://arduino.cc/en/Guide/Environment

Nota. El programa en su última versión 2.0.3, dispone de un peso de 161 MB en presentación de archivo ejecutable. Tomado de: (Arduino, s.f.)

Las partes que componen el campo de visualización del programa IDE Arduino son delimitadas de manera numérica en la Figura 34 y mencionadas posteriormente.

Figura 34

Interfaz gráfica de IDE Arduino



Nota. El programa dispone, dentro de su menú, una sección destinada a la orientación para el usuario, en el cual es posible consultar y seguir recomendaciones de su propia comunidad.

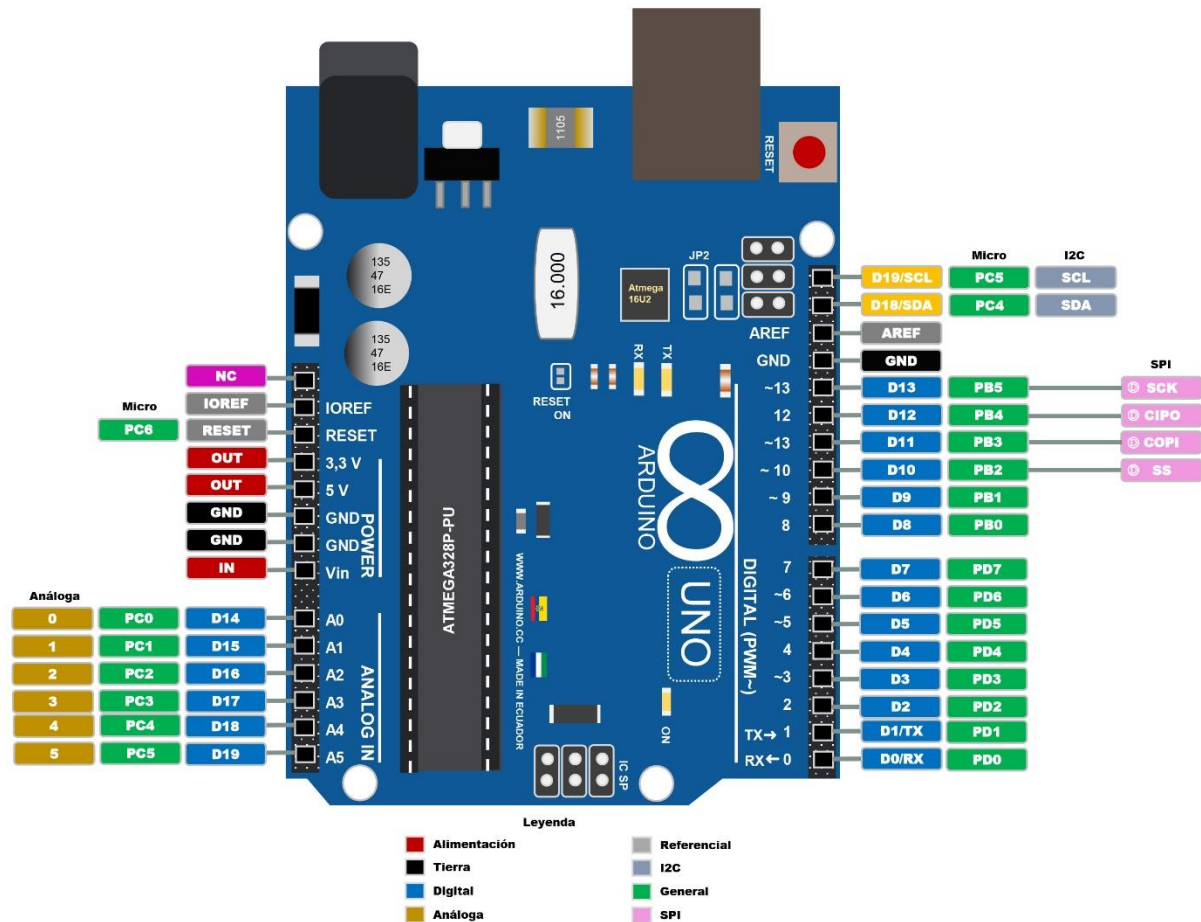
1. Menú: este apartado integra todas las funciones que proporciona el programa al usuario. Dispone de cuatro designaciones principales que albergan una serie de configuraciones.
2. Acceso rápido: establece seis funciones de elección rápida, las mismas que pueden ser seleccionadas en la barra de menú. Aquellas funciones permiten agregar archivos compatibles al software, compilar, subir el lenguaje programado al microcontrolador y activar el monitor serie para visualizar los datos recibidos.
3. Pestaña: muestra las pestañas creadas por el programador.
4. Área de código: puede denominarse también como área de trabajo donde el promotor gestionará el lenguaje de programación, previo a la carga del fichero en la placa electrónica.
5. Estado: indica el avance del archivo cuando es compilado y subido al microcontrolador. Cuando el archivo a compilarse presente fallos en su lenguaje, este panel emitirá un mensaje de error que será detallado en el panel de reporte.
6. Reporte: también conocido como notificación de salida que evidencia la compilación. Mostrará a detalle en caso de existir algún error de programación.

7. Información: orienta sobre el modelo de la placa Arduino utilizada para la gestión de la actividad y su puerto de conexión, que es identificado por el computador a través de la denominación COM.

El archivo de programación o sketch será subido a la placa Arduino Uno R3, la misma que dispone de varios pines de entrada y salida.

Figura 35

Pines del Arduino UNO R3



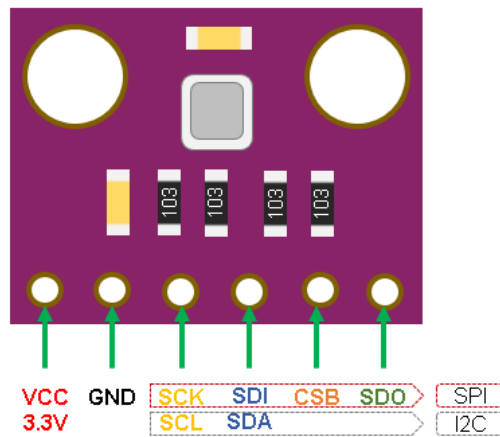
Nota. La placa integra 27 terminales de entrada y salida, seis de estas son de señal análoga, mientras que en señal digital cuenta con ocho de señal abierta y seis de manifestación PWM, por último, incluye cinco pines de alimentación.

Por medio del sensor BMP280, permitirá captar los datos de presión y temperatura en la cámara de ensayo, el mismo que será ubicado en diferentes puntos de la carrocería del vehículo a estudiar. Esta herramienta de sensado dispone de seis puntos de conexión que son usados de acuerdo a la objetividad del proyecto.

En la Figura 36 es notable visualizar las partes del sensor barométrico, mientras que la Tabla 56, describe las principales características extraídas del portal web de Arduino en su página auxiliar llamada Arduino Project Hub.

Figura 36

Puntos de entrada y salida del sensor BMP280



Nota. El sensor usará únicamente cuatro de los seis puntos de vinculación cuando el circuito no utilice más de un dispositivo de sensado.

Tabla 56

Características generales del sensor barométrico 280

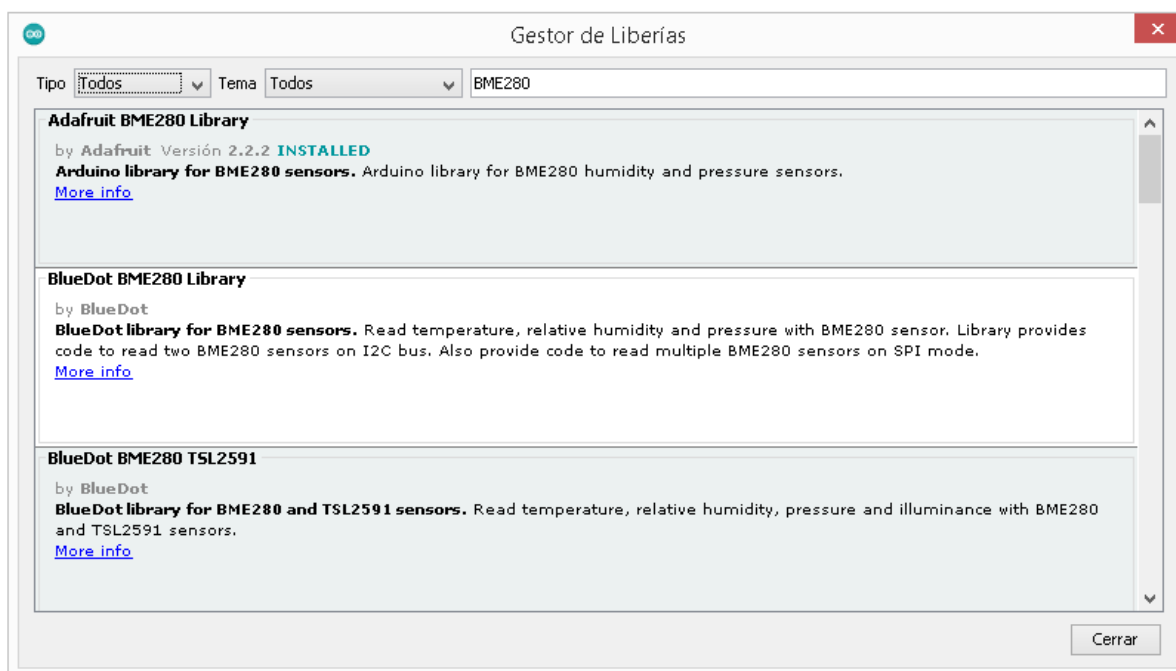
Propiedades	Detalles
Voltaje de funcionamiento	1,71 a 3,6 V
Corriente máxima permisible	1,12 mA
Temperatura de operación	-40 a +85 °C
Presión de operación	300 a 1100 hPa
Precisión	±0,12 hPa y ±1,0 m
Protocolos de comunicación	I2C y SPI

Nota. El sensor opera de manera simple con una alimentación de 3,3 voltios y no admite la tensión de 5 voltios. Ambos valores disponibles en la sección power del Arduino Uno R3. Tomado de: (Arduino, s.f.)

Previo a la creación del código en la plataforma IDE, es obligatorio incluir las librerías necesarias para la gestión de la compilación, tal como muestra la Figura 37, donde la librería inducida es para el sensor barométrico.

Figura 37

Librería para el sensor BMP280



Nota. Adafruit es el diseñador de la librería presentada en imagen, es necesario instalar tanto la librería BMP280 y BME280. Una vez agregado y reconocido por el IDE Arduino, deberá cambiarse (en su archivo raíz) la dirección de x076 por x077 para habilitar la lectura del sensor.

La conexión del circuito y el *sketch*, puede verse en la sección de anexos, donde su programación alberga la lectura por medio de ciclo sensores declarados en el código (ver Figura 78).

4.2 Microsoft Visual Studio

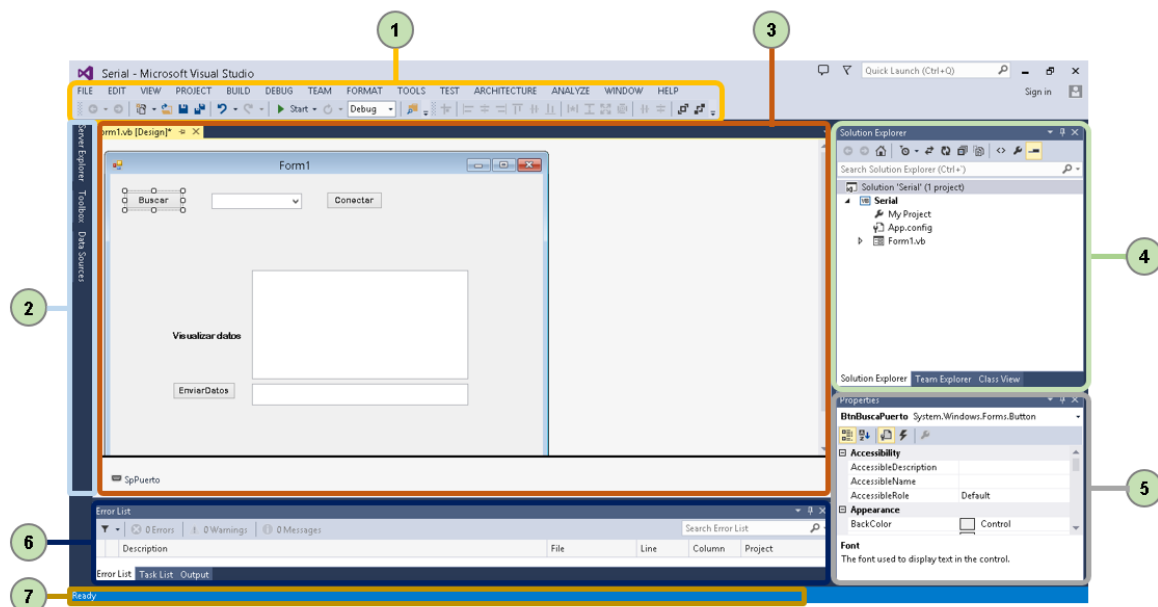
La visualización de los datos captados por la placa microcontroladora puede gestionarse por medio del monitor serie del IDE Arduino, sin embargo, la creación de una interfaz gráfica en Microsoft Studio, concede un mejor aspecto didáctico al espectador. La versión del programa a utilizar corresponde a la edición 2013 y está constituido por las siguientes herramientas básicas, enlistada en la Figura 38.

1. Menú: esta barra agrupa las utilidades del programa, puesto a que, en esta se gestiona la habilitación de comandos, apertura e inicio de proyectos almacenados, entre otras.
2. Instrumentos: alojamiento de las herramientas necesarias para la confección y moldeo del formulario.

3. Diseño de formulario: gestión y visualización del formulario desarrollado por el usuario por medio de utilización de los demás controles.
4. Explorador: pormenoriza el proyecto que está en desarrollo junto a los formularios creados, donde por medio del desplazamiento de la flecha contenedora, podrá dirigirse a la pestaña de diseño o al editor de código.
5. Propiedades: esta ventana permite modificar las características de cada control añadido al formulario, por ejemplo, apariencia, tipo de fuente, posición, color de formato, entre otras cualidades.
6. Lista de error: el propio programa indica por medio del subrayado en rojo cuando el término de programación presenta errores, sin embargo, también puede visualizarse por medio del panel de lista de error, al momento de compilarse el todo el diseño.
7. Estado: la barra de condición determinada el estado actual del programa.

Figura 38

Partes numeradas de Microsoft Visual Studio



Nota. La representación gráfica alude a la versión Profesional de edición 2013, cuya compatibilidad está abierta a partir de sistemas operativos con Windows 7.

Capítulo V. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DE AIRE EN EL CIRCUITO

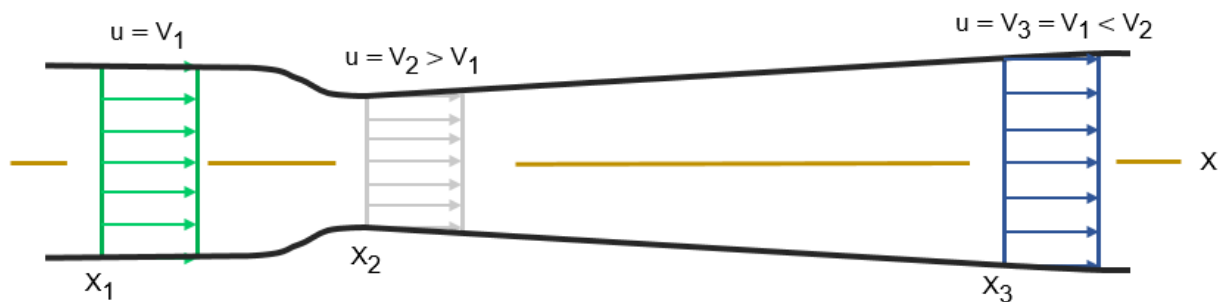
5.1 Aplicación del método analítico en torno a la mecánica de fluidos

5.1.2 Antecedentes

Se presenta como supuesto que el flujo es unidimensional, estable y constante en el circuito con variación de área (túnel de viento), en donde la velocidad del aire aumenta o disminuye de acuerdo a la compresión o expansión geométrica del recinto.

Figura 39

Flujo uniforme y constante en una tubería de área variable



Tomado de: (Munson et al., 2002, p. 175)

La Figura 39, estipula que, conforme el fluido recorre desde la sección 1 (x_1) hacia la sección 2 (x_2), la velocidad incrementa de v_1 a v_2 , es decir, el flujo desarrolla una mayor rapidez. En cambio, en la transición de flujo que se da en la sección 2 hacia la sección 3 (x_3), ocurre un proceso inverso, ya que se experimenta una desaceleración (Munson et al., 1999, p. 190).

Al poner a prueba un modelo escalado geoméricamente de un prototipo determinado dentro de un túnel de viento, la velocidad del aire que se presente en el circuito será simulada como la velocidad en la que fluye el objeto (Çengel & Cimbala, 2006, p. 279).

5.1.3 Presión atmosférica

La presión atmosférica media o estándar al nivel del mar corresponde a $1,013 \cdot 10^5$ Pascales (Pa), o lo que sería lo mismo indicar en otra magnitud, que dicha presión equivaldría a 1013 hectopascales (hPa) (Jacob & Mickley, 1999, p. 12).

En la mayoría de los casos, en cuanto al valor de la masa molar de una molécula de aire, se recomienda considerar que aquello se encuentre en estado seco (esta es conocida con la sigla

“mda” y se deriva del término en inglés: molar mass of dry air), la misma que es igual a $0,028966 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ o $28,966 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ (Gatley et al., 2008, p. 657).

La constante de Boltzmann, válida para la aplicación en fórmulas matemáticas en el ámbito de la ingeniería como en las áreas de mecánica e industrial, equivale a $1,38066 \cdot 10^{-23}$ (Kadry, 2013).

Es importante considerar que, la unidad escrita en gramos sobre mol ($\frac{\text{g}}{\text{mol}}$), es equivalente a las unidades de masa atómica unificada o denominada simplemente como Dalton (Da); para que esta magnitud de masa sea considerada en la Ecuación (20), tendrá que ser transcrita a la unidad de kilogramo, por lo que un Dalton representa $1,66053904 \cdot 10^{-27}$ kilogramos.

Recolección de los datos:

Entonces, si $1 \text{ Da} = 1 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, la molécula de aire seco es igual a 28,966 Da, y esta simultáneamente representa a $4,8099 \cdot 10^{-26}$ kg de masa.

El valor correspondiente a la temperatura también se modificará, puesto a que su unidad inicial de grado Celsius ($^{\circ}\text{C}$), será convertida a grado Kelvin (K).

Tabla 57

Información para el cálculo de la presión atmosférica

Simbología	Significado	Valor	Unidad
p_0	Presión atmosférica normal a nivel del mar	1013	hPa
m	Masa de una molécula de aire seco	4,80992E-26	kg
g	Fuerza gravitatoria	9,80665	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
h	Altura sobre el nivel del mar	5	m. s. n. m
k	Constante de Boltzmann	1,38066E-23	$\frac{\text{J}}{\text{K}}$
T	Temperatura del aire	303,15	K

Nota. ^a Se considera la altitud promedio en donde se prevé llevar a cabo los estudios en el prototipo aerodinámico.

Sustitución de valores:

$$P = 1013 \text{ hPa} \cdot \exp \left[- \frac{(4,8099 \cdot 10^{-26} \text{ kg}) \cdot 9,80665 \text{ m/s}^2 \cdot 5 \text{ m}}{(1,38066 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}) \cdot 303,15 \text{ K}} \right]$$

$$P = 1012,4293 \text{ hPa}$$

5.1.4 Densidad del aire

Determinación de la densidad del aire mediante la aplicación de la Ecuación (21):

Se recolecta los datos de las variables que han sido definidas anteriormente, en cuanto a la estructura de la ecuación.

Tabla 58

Información para el cálculo de la densidad del aire (método 1)

Simbología	Significado	Valor	Unidad
P	Presión atmosférica o barométrica	1012,4293	hPa
h_r	Humedad relativa del aire	60,00% ^a	—
T	Temperatura del aire	30	°C

Nota. ^a La humedad relativa simboliza el valor promedio que se presenta en el ambiente (ciudad de Guayaquil) en la cual se realizará el estudio aerodinámico.

Se sustituye los datos pertinentes sobre la ecuación preestablecida.

$$\rho = \frac{0,34848 \cdot 1012,4198 \text{ hPa} - 0,009 \cdot 60\% \cdot \exp(0,061 \cdot 30 \text{ °C})}{273,15 \text{ K} + 30 \text{ °C}}$$

$$\rho = 1,1637 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Determinación de la densidad del aire mediante la aplicación de la Ecuación (23):

Correspondiente a la estructura de las componentes de la Ecuación (23), se necesita considerar cierta información concerniente a el área de la termodinámica, para aquello se recurre a la siguiente tabla.

Tabla 59

Propiedades de un gas ideal de aire

Tabla A-1					
Masa molar, constante de gas y calores específicos de gas ideal					
Sustancia	Masa molar M, kg/kmol	Constante de gas R, kJ/kg · K	Datos de calores específicos a 25 °C		
			C_p , kJ/kg · K	C_v , kJ/kg · K	$k = C_p/C_v$
Aire	28,97	0,2870	1,005	0,7180	1,400

Nota. La tabla muestra condiciones del aire a una temperatura estándar (ver Anexo 8)

A continuación, se señala el proceso de cálculo establecido por Çengel y Cimbala (2006) para la determinación de la constante del aire a una temperatura termodinámica (absoluta), indiferentemente del tipo gas (p. 38).

$$R = \frac{R_u}{M} \quad (81)$$

Donde:

R = constante del gas

R_u = constante universal de los gases

M = masa molar o peso molecular

Para la utilización de la Ecuación (81), se toma en cuenta la siguiente información, respecto al aire:

Tabla 60

Información para el cálculo de la constante de gas

Simbología	Significado	Valor	Unidad
R_u	Constante general de los gases	8,314	$\frac{kJ}{kmol}$
M	Masa molecular	28,97	$\frac{kg}{kmol}$

Tomado de: (Çengel & Cimbala, 2006, p. 38)

Al sustituir los valores anteriores en la Ecuación (81), se obtiene que la constante de gas es igual a $0,2869 \frac{kJ}{kg \cdot K}$, la misma que representa un valor muy cercano al dato estándar visualizado en la Tabla 59.

Justo después de que se haya conocido los datos de los parámetros que constan en la Ecuación (23), se recolecta a través de la tabla siguiente.

Tabla 61

Información para el cálculo de la densidad del aire (método 3)

Simbología	Significado	Valor	Unidad
P	Presión atmosférica	101242,9348	$\frac{N}{m^2}$
R	Constante de gas	287	$\frac{N \cdot m}{kg \cdot K}$
T	Temperatura	303,15	K

En la Tabla 62, se ha considerado transformar la unidad de Hectopascal que posee la presión barométrica, a la magnitud del Newton sobre metro cuadrado, por lo cual se toma en cuenta que: $1 \text{ Pa} = 100 \frac{N}{m^2}$. Además, se considera expresar la unidad que componen el numerador de la constante de gas, en unidades de Newton metro, por lo que se indica que: $1 \text{ kJ} = 100 \text{ N} \cdot \text{m}$.

Al efectuar el despeje de la variable densidad y la sustitución de los datos pertinentes en la Ecuación (23), se halla que: $\rho = 1,1637 \frac{kg}{m^3}$.

5.1.5 Velocidad sónica

Determinación de la velocidad del sonido con la aplicación de la Ecuación (24):

Correspondiente a la utilización de la Ecuación (24), únicamente se toma como dato la temperatura del aire promedio en la ciudad de Guayaquil (30 °C) (Meteored, s.f.).

$$v_s = 331,30 \frac{\text{m}}{\text{s}} + \left(0,606 \frac{\text{m/s}}{\text{C}} \cdot 30 \text{ °C} \right)$$

$$v_s = 349,48 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Determinación de la velocidad sónica con la aplicación de la Ecuación (25):

En el caso del manejo de la Ecuación (25), esta dependerá que se le atribuya propiedades termodinámicas, las mismas que estarán influenciadas por suposiciones de aire estándar, referidas en la Tabla 59.

Se considera que, la unidad que representa en principio a la constante de gas, tiene que ser expresada en la magnitud de Joules sobre kilogramo por Kelvin. Por lo cual, si un $1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ es equivalente a 1000 J, la constante de gas es igual a $287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$.

El valor de la temperatura deberá estar sujeta a la unidad representativa de la escala de Kelvin, por lo que $30\text{°C} = 303,15 \text{ K}$.

Por tanto, se obtiene como datos finales aquellos que se arrojan en la tabla que se muestra inmediatamente.

Tabla 62

Información para el cálculo de la velocidad sónica (método 2)

Simbología	Significado	Valor	Unidad
k	Constante adiabática	1,4	—
R	Constante del gas ideal	287	$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
T	Temperatura del aire	303,15	K

Luego de esclarecer los datos requeridos, se emplea la sustitución de valores en la Ecuación (25).

$$v_s = \sqrt{1,4 \cdot 287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 303,15 \text{ K}}$$

$$v_s = 349,0067 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

5.1.6 Número de mach en relación a la velocidad más alta en el sistema aerodinámico

La clasificación de flujo respecto al número de Mach, será identificada de acuerdo a la velocidad de mayor representación que fluirá por el túnel de viento, es decir, la velocidad que recorre la sección de ensayos, para esto se aplica la Ecuación (26).

Recolección de los datos:

Tabla 63

Información para el cálculo del número de Mach

Simbología	Significado	Valor	Unidad
v	Velocidad del fluido	25	$\frac{m}{s}$
v _s	Velocidad del sonido	349,48 ^a	$\frac{m}{s}$

Nota. ^a Se ha considerado el valor de la velocidad sónica obtenida a través del desarrollo del cálculo del primer método.

Sustitución de valores:

$$Ma = \frac{25 \text{ m/s}}{349,48 \text{ m/s}}$$

$$Ma = 0,0715$$

De acuerdo al resultado encontrado, se realiza la clasificación del flujo según el número de Mach, el mismo que es especificado en la Tabla 64.

Tabla 64

Caracterización del flujo

	Criterio de evaluación	Tipo de flujo
Clasificación simple	Ma < 1	Subsónica
Clasificación completa	Ma < 0,3	Flujo Incomprensible

Nota. Se delimita la condición de flujo de acuerdo al rango en que se situó respecto a los intervalos del número de Mach. Tomado de: (Martínez de la Calle, 2009, p. 4)

5.1.7 Velocidades en las secciones: Ecuación de Continuidad

Es necesario señalar que, de acuerdo a la caracterización de flujo realizada con anterioridad, específicamente en el proceso de cálculo del número de Mach, y en la cual se ha determinado que el flujo expone cualidades de incomprensibilidad, se considerará aplicar la Ecuación (27).

Cámara de pruebas

La velocidad en la sección de ensayos (v_{ts}), técnicamente será la misma en su entrada (v_{1ts}) y a su salida (v_{2ts}), es decir, que la velocidad se mantendrá constante a lo largo de toda la cámara, o al menos presentarán mínimamente variaciones que serán totalmente despreciables.

La velocidad en la sección de pruebas corresponderá a la velocidad propuesta para el estudio en el modelo vehicular, la cual corresponde a $v_{ts} = 25 \text{ m/s}$, a esta velocidad también se le considera como velocidad máxima en el sistema.

Contracción

Debido a las características de diseño que identifica a la cámara de convergencia, se presentarán variaciones considerables en cuanto a la velocidad del aire que fluya a la interna de esta cámara.

Velocidad a la salida de la contracción

De manera teórica se puede indicar que, la velocidad a la salida de la contracción (v_{2c}), es la misma que la velocidad que ingresa a la cámara de ensayos (v_{ts}), debido a que evidentemente ambos componentes se mantienen entrelazados en dichas zonas. Por lo cual, su relación teórica es $v_{2c} = v_{ts}$, lo que daría como resultado que, $v_{2c} = 25 \text{ m/s}$.

Velocidad a la entrada de la contracción

A razón de que la contracción presenta un aspecto de diseño curvilíneo, y por ende las dimensiones de área y de la velocidad, tanto de la sección principal y posterior de dicha cámara, divergirán entre sí, lo que hace que sea necesario que se apoye sobre la Ecuación (28), para determinar la velocidad en la entrada de la contracción (v_{1c}).

Reestructuración de la Ecuación (28):

De la Ecuación (28), se despeja la variable de interés, y se genera el planteamiento de la siguiente fórmula:

$$v_{1c} = \frac{A_{2c} \cdot v_{2c}}{A_{1c}} \quad (82)$$

Donde:

v_{1c} = velocidad en la sección delantera de la contracción

A_{2c} = área en la sección posterior de la contracción

v_{2c} = velocidad en la sección posterior de la contracción

A_{1c} = área en la sección delantera de la contracción

Recolección de los datos:

Tabla 65*Información para el cálculo de la velocidad de entrada en la contracción*

Simbología	Significado	Valor	Unidad
A_{2c}	Área a la salida de la contracción	0,0191	m^2
v_{2c}	Velocidad a la salida de la contracción	25	$\frac{m}{s}$
A_{1c}	Área a la entrada de la contracción	0,1147	m^2

Sustitución de valores:

$$v_{1c} = \frac{0,0191 \text{ m}^2 \cdot 25 \text{ m/s}}{0,1147 \text{ m}^2}$$

$$v_{1c} = 4,1667 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Variación de velocidades en la contracción (por secciones)

A través de emplear la Ecuación (83), se puede obtener la distribución de velocidad en la tobera de entrada respecto a un punto de referencia en un sistema coordenado.

$$v_2 = \frac{v_1 \cdot A_1}{A_2} \quad (83)$$

Al tener en cuenta que el fluido viaja en dirección axial en el circuito, la velocidad v_{1c} y el área A_{1c} en la sección de entrada de la contracción, se los considera como parámetros constantes.

Tabla 66

Velocidad en la contracción en relación a la variación de su área

No. de coordenada	Área de entrada A_{1c} (m^2)	Velocidad de entrada v_{1c} (m/s)	Área de salida A_{2c} (m^2)	Velocidad resultante v_{2c} (m/s) ^a
1	0,1147	4,1667	0,1147	4,1667
2	0,1147	4,1667	0,1146	4,1674
3	0,1147	4,1667	0,1145	4,1724
4	0,1147	4,1667	0,1142	4,1853
5	0,1147	4,1667	0,1135	4,2092
6	0,1147	4,1667	0,1125	4,2470
7	0,1147	4,1667	0,1111	4,3011
8	0,1147	4,1667	0,1092	4,3739
9	0,1147	4,1667	0,1069	4,4677
10	0,1147	4,1667	0,1042	4,5849
11	0,1147	4,1667	0,1010	4,7282
12	0,1147	4,1667	0,0975	4,9003
13	0,1147	4,1667	0,0936	5,1043
14	0,1147	4,1667	0,0894	5,3438
15	0,1147	4,1667	0,0850	5,6227
16	0,1147	4,1667	0,0804	5,9455
17	0,1147	4,1667	0,0756	6,3170
18	0,1147	4,1667	0,0709	6,7427
19	0,1147	4,1667	0,0661	7,2284
20	0,1147	4,1667	0,0614	7,7801
21	0,1147	4,1667	0,0569	8,4041
22	0,1147	4,1667	0,0525	9,1063
23	0,1147	4,1667	0,0483	9,8919
24	0,1147	4,1667	0,0444	10,7647
25	0,1147	4,1667	0,0407	11,7263
26	0,1147	4,1667	0,0374	12,7750
27	0,1147	4,1667	0,0344	13,9047
28	0,1147	4,1667	0,0316	15,1039
29	0,1147	4,1667	0,0292	16,3544
30	0,1147	4,1667	0,0271	17,6310
31	0,1147	4,1667	0,0253	18,9021
32	0,1147	4,1667	0,0237	20,1307
33	0,1147	4,1667	0,0225	21,2774
34	0,1147	4,1667	0,0214	22,3038
35	0,1147	4,1667	0,0206	23,1774
36	0,1147	4,1667	0,0200	23,8760
37	0,1147	4,1667	0,0196	24,3910
38	0,1147	4,1667	0,0193	24,7298
39	0,1147	4,1667	0,0192	24,9163
40	0,1147	4,1667	0,0191	24,9891
41	0,1147	4,1667	0,0191	25,0000

Nota. ^aLa columna demuestra el crecimiento exponencial o continuo de la velocidad en m/s conforme se acerca al área final de la cámara de convergencia.

Para la construcción de la Tabla 67, la cual se visualizará a continuación, se necesita establecer en su segunda columna, cada uno de los tramos que constituyen la distancia total de la contracción Tabla 30, cuyos datos han sido utilizados para la elaboración del perfil lateral de la misma, mientras que, en la columna siguiente a esta, se adhieren las velocidades determinadas con anticipación.

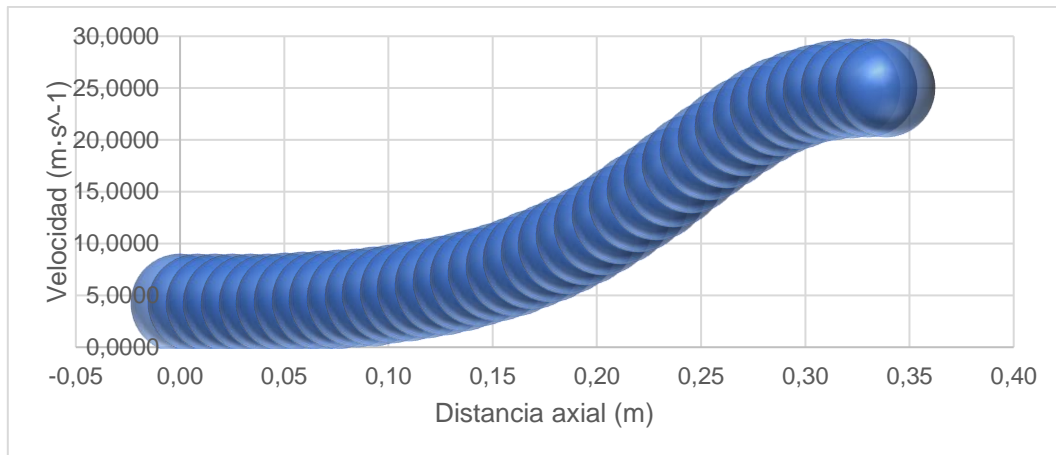
Tabla 67*Trayectoria de velocidad en la tobera*

No. de segmento	Distancia longitudinal: Eje X (m)	Velocidad: Eje Y (m/s)
1	0,00	4,1667
2	0,0085	4,1674
3	0,0169	4,1724
4	0,0254	4,1853
5	0,0339	4,2092
6	0,0423	4,2470
7	0,0508	4,3011
8	0,0593	4,3739
9	0,0677	4,4677
10	0,0762	4,5849
11	0,0847	4,7282
12	0,0931	4,9003
13	0,1016	5,1043
14	0,1101	5,3438
15	0,1185	5,6227
16	0,1270	5,9455
17	0,1355	6,3170
18	0,1439	6,7427
19	0,1524	7,2284
20	0,1608	7,7801
21	0,1693	8,4041
22	0,1778	9,1063
23	0,1862	9,8919
24	0,1947	10,7647
25	0,2032	11,7263
26	0,2116	12,7750
27	0,2201	13,9047
28	0,2286	15,1039
29	0,2370	16,3544
30	0,2455	17,6310
31	0,2540	18,9021
32	0,2624	20,1307
33	0,2709	21,2774
34	0,2794	22,3038
35	0,2878	23,1774
36	0,2963	23,8760
37	0,3048	24,3910
38	0,3132	24,7298
39	0,3217	24,9163
40	0,3302	24,9891
41	0,3386	25,0000

Nota. Al relacionar las variables de distancia y velocidad, se reconoce un crecimiento constante en dichas magnitudes.

Figura 40

Descripción del desplazamiento del flujo en la contracción



Nota. La gráfica de dispersión tipo burbuja demarca que el flujo sigue una trayectoria unidimensional aguas arriba y se adapta al contorno geométrico de la contracción.

En torno a la Figura 40, se constata que la velocidad que surge en el punto de inicio, es decir, en la región delantera del cono de convergencia, crece a medida que el flujo se moviliza por el estrechamiento de la contracción, llegando a obtenerse una velocidad máxima de 25 m/s, la misma que ingresará directamente a la cámara de ensayos.

Cámara de sedimentación

La velocidad manejable en la cámara de estabilización (v_{sc}) será la misma a la que se exhibe a la entrada de la contracción (v_{1c}), en atención a lo cual y debido al contorno geométrico de la presente cámara, se descompone lo siguiente:

La velocidad al comienzo de la cámara es igual a: $v_{1sc} = 4,17 \text{ m/s}$

La velocidad al final de la cámara equivale a: $v_{2sc} = 4,17 \text{ m/s}$

Conociendo que, en las dos secciones de la cámara de sedimentación, existen similitud numérica en cuanto al factor de velocidad, simplemente se empleará el término v_{sc} para catalogar al parámetro de velocidad en toda el área de la cámara.

Difusor

Es imprescindible determinar las velocidades en la sección frontal delantera y posterior del difusor, ya que ambas diferirán entre sí, por motivo de que la geometría del cono de divergencia varía.

Velocidad a la entrada del difusor

Respecto a que la región de salida de la cámara de ensayos antecede a la zona de entrada del cono de divergencia, se puede declarar que la velocidad de esta última cámara es equivalente a la que se halla en la cámara de pruebas, por tanto, se señala que:

Si la $v_{1d} = v_{ts}$, entonces la velocidad que se registra en la primera región del difusor es igual a $v_{1d} = 25 \text{ m/s}$.

Velocidad a la salida del difusor

Reestructuración de la Ecuación (28):

Se fundamenta sobre la Ecuación (28), para deducir la formulación que facilite ubicar la velocidad que se produce en el área posterior del cono de desaceleración, así que, al despejar dicha variable de la fórmula en mención, se logra obtener que:

$$v_{2d} = \frac{A_{1d} \cdot v_{1d}}{A_{2d}} \quad (84)$$

Donde:

v_{2d} = velocidad en la sección posterior del difusor

A_{1d} = área en la sección delantera del difusor

v_{1d} = velocidad en la sección delantera del difusor

A_{2d} = área en la sección posterior del difusor

Recolección de los datos:

Tabla 68

Información para la ecuación de la velocidad de salida del difusor

Simbología	Significado	Valor	Unidad
A_{1d}	Área a la entrada del difusor	0,0191	m^2
v_{1d}	Velocidad a la entrada del difusor	25	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
A_{2d}	Área a la salida del difusor	0,0314	m^2

Sustitución de valores:

$$v_{2d} = \frac{0,0191 \text{ m}^2 \cdot 25 \text{ m/s}}{0,0314 \text{ m}^2}$$

$$v_{2d} = 15,2082 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Variación de velocidad por secciones en el difusor

Para conocer la repartición de velocidad a lo largo de la cámara de divergencia, se sigue la estructura que ostentan la siguiente tabla de datos.

Tabla 69

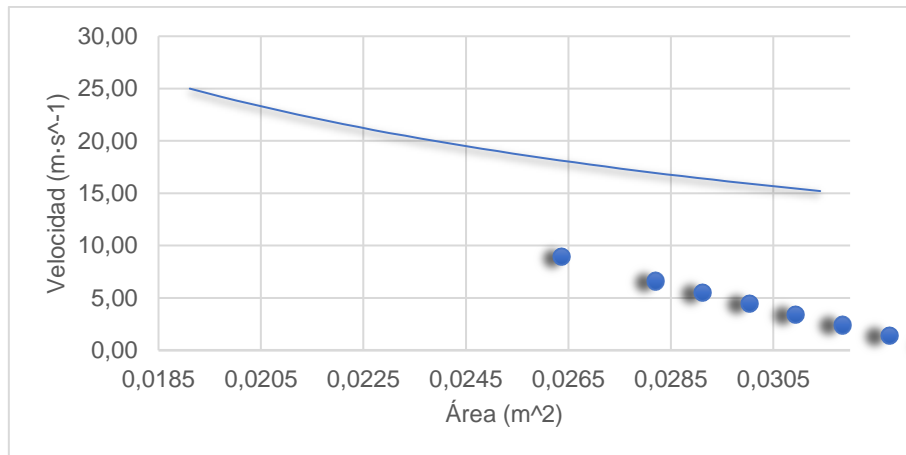
Datos para la verificación de la velocidad alternante en el difusor

No. de coordenada	Área en la entrada del difusor A_{1d} (m ²)	Velocidad en la entrada del difusor v_{1d} (m/s)	Área en la salida del difusor A_{2c} (m ²)	Velocidad resultante en función a la división por puntos en el difusor v_{2d} (m/s)
1	0,0191	25	0,0191	25,0000
2	0,0191	25	0,0197	24,2387
3	0,0191	25	0,0200	23,8752
4	0,0191	25	0,0203	23,5224
5	0,0191	25	0,0206	23,1800
6	0,0191	25	0,0209	22,8473
7	0,0191	25	0,0212	22,5240
8	0,0191	25	0,0215	22,2098
9	0,0191	25	0,0218	21,9042
10	0,0191	25	0,0221	21,6069
11	0,0191	25	0,0224	21,3176
12	0,0191	25	0,0227	21,0359
13	0,0191	25	0,0230	20,7616
14	0,0191	25	0,0233	20,4943
15	0,0191	25	0,0236	20,2338
16	0,0191	25	0,0239	19,9799
17	0,0191	25	0,0242	19,7322
18	0,0191	25	0,0245	19,4907
19	0,0191	25	0,0248	19,2549
20	0,0191	25	0,0251	19,0248
21	0,0191	25	0,0254	18,8001
22	0,0191	25	0,0257	18,5807
23	0,0191	25	0,0260	18,3664
24	0,0191	25	0,0263	18,1569
25	0,0191	25	0,0266	17,9521
26	0,0191	25	0,0269	17,7520
27	0,0191	25	0,0272	17,5562
28	0,0191	25	0,0275	17,3647
29	0,0191	25	0,0278	17,1773
30	0,0191	25	0,0281	16,9940
31	0,0191	25	0,0284	16,8145
32	0,0191	25	0,0287	16,6387
33	0,0191	25	0,0290	16,4666
34	0,0191	25	0,0293	16,2981
35	0,0191	25	0,0296	16,1329
36	0,0191	25	0,0299	15,9711
37	0,0191	25	0,0302	15,8124
38	0,0191	25	0,0305	15,6569
39	0,0191	25	0,0308	15,5044
40	0,0191	25	0,0311	15,3549
41	0,0191	25	0,0314	15,2082

Nota. Se toma la misma consideración respecto a la organización de la cantidad de tramos cartesianos aplicados anteriormente para la determinación de la variación de velocidad en la contracción.

Figura 41

Comportamiento de la velocidad vs área en la cámara de divergencia



Nota: La gráfica de dispersión ha recibido una modificación de formato en cuanto al espaciado de los intervalos del eje horizontal, para poder apreciar el recorrido del fluido en la sección.

La Figura 41, muestra la desaceleración que envuelve al flujo conforme este se mueve hacia la salida del cono divergente, esto se debe al aumento progresivo del área de la cámara en mención, por lo que se cumple su funcionalidad principal.

5.1.8 Presiones en las secciones: Ecuación de Bernoulli

Presión en la cámara de sedimentación

Para efectos del presente documento, se ha propuesto que el prototipo aerodinámico cuente con la característica de ser de circuito abierto, por tal motivo se toma en consideración a la presión atmosférica que yace en el entorno exterior del sistema, y se pone en supuesto que dicha presión es la que albergará y se mantendrá permanente dentro de la cámara de estabilización, debido a que las áreas de esta sección en términos generales, son equitativas, siendo así una presión totalmente estática. Consecuente a esto, se dice que si $P_{sc} = P$, entonces:

$$P_{1_{sc}} = 1012,4293 \text{ hPa} \rightarrow \text{Presión a la entrada de la cámara de decantación}$$

$$P_{2_{sc}} = 1012,4293 \text{ hPa} \rightarrow \text{Presión a la salida de la cámara de decantación}$$

Presión en la cámara de contracción

Presión en la entrada de la contracción

Concorde a que, la sección delantera de la tobera de divergencia está adscrita a la región de salida de la cámara de sedimentación, la presión que se halla en esta última, se transfiere

automáticamente a la zona más próxima (que, para este caso en particular, se trataría de la entrada de la contracción). Por ello se indica lo siguiente:

Si $P_{1c} = P_{sc}$, entonces la presión de la zona delantera de la cámara de convergencia es equivalente a $P_{1c} = 1012,4293$ hPa.

Presión en la salida de la contracción

Basándose en la Ecuación (32), se puede extraer la relación matemática que posibilite precisar el resultado de la presión subsiguiente (P_2) respecto a la primera presión registrada en la actual cámara. Esta formulación es imprescindible aplicarla, ya que la apariencia geométrica de la tobera de divergencia es variable, tal como se ha hecho aquel señalamiento en procedimientos anteriores.

Reestructuración de la ecuación (32):

Se efectúa el despeje de la variable que representaría a la presión de la zona posterior del cono convergente.

$$P_2 = P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 \quad (85)$$

Recolección de los datos:

Resulta necesario que de acuerdo a las unidades de medida que serán manejadas en la aplicación de la Ecuación (85), la magnitud de la presión de la sección delantera de la contracción (P_1) dada en hectopascal (hPa), tendrá que tornarse a la unidad del sistema internacional de Pascal (Pa). En cuanto a lo anterior, se realiza la siguiente expresión:
hPa a Pa $\Rightarrow 1$ hPa = 100 Pa

Tabla 70

Información para la fórmula de la presión a la salida de la contracción

Simbología	Significado	Valor	Unidad
P_{1c}	Presión a la entrada de la contracción	101242,9348	Pa
ρ	Densidad el aire	1,1637	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
v_{1c}	Velocidad a la entrada de la contracción	4,1667	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
v_{2c}	Velocidad a la salida de la contracción	25	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$

Sustitución de valores:

$$P_{2c} = 101241,9348 \text{ Pa} + \frac{1}{2} \cdot 1,1637 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(4,1667 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 - \frac{1}{2} \cdot 1,1637 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(25 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2$$

$$P_{2c} = 100889,3781 \text{ Pa} \approx 1008,8938 \text{ hPa}$$

Variación de presión en la contracción

Para objeto de la elaboración de la Tabla 71, se hace aplicación de la Ecuación (85), en donde las variables que correspondan a la sección de inicio de la contracción (sección 1) no variarán, debido a que, se considera el sentido de la dirección de flujo, y por tanto las variables de la otra sección (sección 2), es la que en teoría presentará variaciones, adicional a esto, el valor de la densidad del gas se considera como una cifra numérica permanente, por motivo de la condición de incomprensibilidad.

Tabla 71

Distribución de presiones en la contracción

No. de sección	Presión en la entrada de la contracción P_{1c} (Pa)	Densidad del aire ρ (kg/m^3)	Velocidad a la entra de la contracción v_{1c} (m/s)	Velocidad a la salida de la contracción v_{2c} (m/s)	Presión resultante en función a la segmentación por secciones en la contracción P_{2c} (Pa)
1	101242,9348	1,1637	4,1667	4,1667	101242,9348
2	101242,9348	1,1637	4,1667	4,1674	101242,9312
3	101242,9348	1,1637	4,1667	4,1724	101242,9071
4	101242,9348	1,1637	4,1667	4,1853	101242,8445
5	101242,9348	1,1637	4,1667	4,2092	101242,7275
6	101242,9348	1,1637	4,1667	4,2470	101242,5417
7	101242,9348	1,1637	4,1667	4,3011	101242,2727
8	101242,9348	1,1637	4,1667	4,3739	101241,9053
9	101242,9348	1,1637	4,1667	4,4677	101241,4226
10	101242,9348	1,1637	4,1667	4,5849	101240,8050
11	101242,9348	1,1637	4,1667	4,7282	101240,0287
12	101242,9348	1,1637	4,1667	4,9003	101239,0647
13	101242,9348	1,1637	4,1667	5,1043	101237,8770
14	101242,9348	1,1637	4,1667	5,3438	101236,4210
15	101242,9348	1,1637	4,1667	5,6227	101234,6412
16	101242,9348	1,1637	4,1667	5,9455	101232,4687
17	101242,9348	1,1637	4,1667	6,3170	101229,8178
18	101242,9348	1,1637	4,1667	6,7427	101226,5831
19	101242,9348	1,1637	4,1667	7,2284	101222,6351
20	101242,9348	1,1637	4,1667	7,7801	101217,8170
21	101242,9348	1,1637	4,1667	8,4041	101211,9410
22	101242,9348	1,1637	4,1667	9,1063	101204,7868
23	101242,9348	1,1637	4,1667	9,8919	101196,1028
24	101242,9348	1,1637	4,1667	10,7647	101185,6126
25	101242,9348	1,1637	4,1667	11,7263	101173,0287
26	101242,9348	1,1637	4,1667	12,7750	101158,0779
27	101242,9348	1,1637	4,1667	13,9047	101140,5398
28	101242,9348	1,1637	4,1667	15,1039	101120,2991
29	101242,9348	1,1637	4,1667	16,3544	101097,4106
30	101242,9348	1,1637	4,1667	17,6310	101072,1656
31	101242,9348	1,1637	4,1667	18,9021	101045,1460
32	101242,9348	1,1637	4,1667	20,1307	101017,2425
33	101242,9348	1,1637	4,1667	21,2774	100989,6160
34	101242,9348	1,1637	4,1667	22,3038	100963,5884
35	101242,9348	1,1637	4,1667	23,1774	100940,4685
36	101242,9348	1,1637	4,1667	23,8760	100921,3431
37	101242,9348	1,1637	4,1667	24,3910	100906,8804
38	101242,9348	1,1637	4,1667	24,7298	100897,1958
39	101242,9348	1,1637	4,1667	24,9163	100891,8097
40	101242,9348	1,1637	4,1667	24,9891	100889,6951
41	101242,9348	1,1637	4,1667	25,0000	100889,3781

Nota. La tabla considera emplear las mismas divisiones de las secciones que fueron designadas para la construcción de la silueta lateral de la contracción.

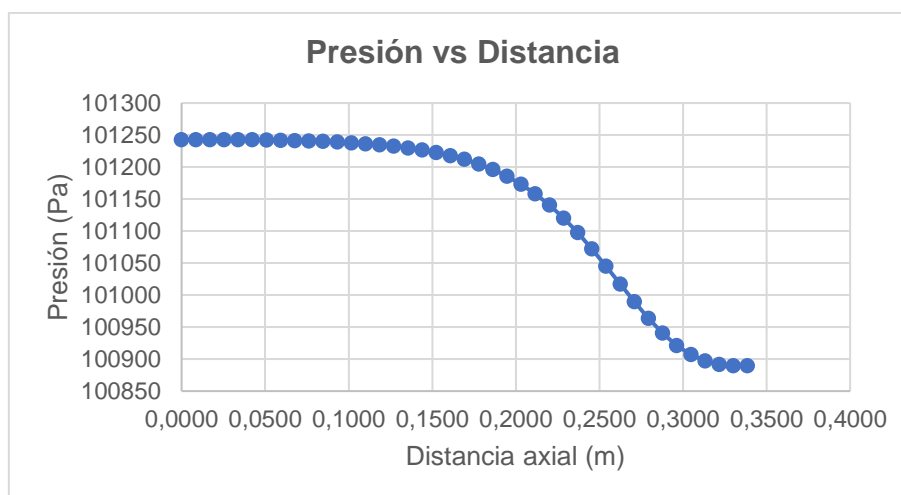
A continuación, se toma en consideración componer los datos de las distintas presiones obtenidas y la distancia en un punto axial en la siguiente tabla, para conseguir la gráfica que ayude visualizar el proceder de las presiones en la tobera convergente.

Tabla 72*Datos para el trazo de la línea de presión en la contracción*

No. de tramo	Distancia longitudinal: Eje x (m)	Presión en relación a una sección interna en la contracción: Eje y (Pa)
1	0	101242,9348
2	0,0085	101242,9312
3	0,0169	101242,9071
4	0,0254	101242,8445
5	0,0339	101242,7275
6	0,0423	101242,5417
7	0,0508	101242,2727
8	0,0593	101241,9053
9	0,0677	101241,4226
10	0,0762	101240,8050
11	0,0847	101240,0287
12	0,0931	101239,0647
13	0,1016	101237,8770
14	0,1101	101236,4210
15	0,1185	101234,6412
16	0,1270	101232,4687
17	0,1355	101229,8178
18	0,1439	101226,5831
19	0,1524	101222,6351
20	0,1608	101217,8170
21	0,1693	101211,9410
22	0,1778	101204,7868
23	0,1862	101196,1028
24	0,1947	101185,6126
25	0,2032	101173,0287
26	0,2116	101158,0779
27	0,2201	101140,5398
28	0,2286	101120,2991
29	0,2370	101097,4106
30	0,2455	101072,1656
31	0,2540	101045,1460
32	0,2624	101017,2425
33	0,2709	100989,6160
34	0,2794	100963,5884
35	0,2878	100940,4685
36	0,2963	100921,3431
37	0,3048	100906,8804
38	0,3132	100897,1958
39	0,3217	100891,8097
40	0,3302	100889,6951
41	0,3386	100889,3781

Figura 42

Comportamiento de la presión en el interior de la contracción



Nota. La gráfica de dispersión describe la acción de la magnitud de la presión en su recorrido longitudinal (izquierda a derecha).

En relación a la figura anterior, se logra apreciar que existe un índice mayor de presión al comienzo de la geometría de la tobera de convergencia, pero esta magnitud empieza a disminuir simultáneamente cuando se traza su trayectoria horizontal hacia la sección de salida de la contracción, por tanto, se habla de que se genera una caída de presión.

Coefficiente de presión por área en la contracción

En esta sección se dará aplicación de la Ecuación (55), para hallar los coeficientes de presión que se registran en la cámara de convergencia.

Recolección de datos:

Tabla 73

Información para el cálculo de los coeficientes de presión en la tobera

Simbología	Significado	Valor	Unidad
A_{ts}	Área de la cámara de prueba	0,0191	m^2
$A(x)^a$	Área en relación a las coordenadas	$A_{2c} \geq A(x) \leq A_{ts}$	m^2

Nota. ^a El área en base a un punto cartesiano en el eje x, está asociada con cada uno de los tramos seccionados verticalmente en la contracción (ver Tabla 30).

Sustitución de valores:

Valiéndose de la Ecuación (34), se obtiene los coeficientes adimensionales de acuerdo al número de estratificaciones habientes en el interior de la contracción.

Tabla 74

Gradientes de presión en relación a las áreas totales a lo largo de la contracción

No. de secciones al interior de la cámara	Área de la cámara de prueba A_{ts} (m^2)	Área respecto a la altura total de la contracción en función de las coordenadas $A(x)$ (m^2) ^a	Coefficiente o gradiente de presión en la cámara de convergencia C_p (adimensional)
1	0,0191	0,1147	0,9722
2	0,0191	0,1146	0,9722
3	0,0191	0,1145	0,9721
4	0,0191	0,1142	0,9720
5	0,0191	0,1135	0,9717
6	0,0191	0,1125	0,9711
7	0,0191	0,1111	0,9704
8	0,0191	0,1092	0,9694
9	0,0191	0,1069	0,9681
10	0,0191	0,1042	0,9664
11	0,0191	0,1010	0,9642
12	0,0191	0,0975	0,9616
13	0,0191	0,0936	0,9583
14	0,0191	0,0894	0,9543
15	0,0191	0,0850	0,9494
16	0,0191	0,0804	0,9434
17	0,0191	0,0756	0,9362
18	0,0191	0,0709	0,9273
19	0,0191	0,0661	0,9164
20	0,0191	0,0614	0,9032
21	0,0191	0,0569	0,8870
22	0,0191	0,0525	0,8673
23	0,0191	0,0483	0,8434
24	0,0191	0,0444	0,8146
25	0,0191	0,0407	0,7800
26	0,0191	0,0374	0,7389
27	0,0191	0,0344	0,6907
28	0,0191	0,0316	0,6350
29	0,0191	0,0292	0,5721
30	0,0191	0,0271	0,5026
31	0,0191	0,0253	0,4283
32	0,0191	0,0237	0,3516
33	0,0191	0,0225	0,2756
34	0,0191	0,0214	0,2041
35	0,0191	0,0206	0,1405
36	0,0191	0,0200	0,0879
37	0,0191	0,0196	0,0481
38	0,0191	0,0193	0,0215
39	0,0191	0,0192	0,0067
40	0,0191	0,0191	0,0009
41	0,0191	0,0191	0,0000

Nota. ^a Los datos pertenecientes a la tercera columna, han sido obtenidos al doblar las secciones parciales empleadas en el diseño del perfil lateral fraccionado de la contracción.

Figura 43

Coefficiente de presión en la contracción en sentido unidimensional



Nota. En la gráfica se ha considerado invertir el orden de trazado de los datos del eje horizontal al cambiar su formato, para de tal manera ver el comportamiento real de los coeficientes de presión en toda la sección de la tobera.

La gráfica anterior demuestra que, justamente en el área máxima o área de entrada de la contracción, se origina el valor del coeficiente de presión más alto, la misma que es muy cercano a 1, y es notorio que mientras el flujo viaja longitudinalmente (izquierda a derecha), el coeficiente de presión por área decrece, razón por la cual, la gradiente de presión tiende a ser 0 cuando el fluido llega al último tramo, es decir, que el área a la salida de contracción o el área de entrada de la cámara de prueba tendrá un coeficiente de presión con valorización nula.

Presión en la cámara de ensayos

La presión a la entrada de la cámara de pruebas (P_{ts}), es igual a la presión que se registra a la salida de la contracción (P_{2c}); la presión de la cámara de ensayos se mantendría teóricamente constante por toda la sección, esto llega a cumplirse debido al paralelismo geométrico que caracteriza a dicha sección. Por tanto, $P_{ts} = P_{2c}$ y la presión tanto en la parte delantera y posterior de la sección de pruebas es igual a 100889,3781 Pa \approx 1008,8938 hPa.

Presión en la cámara del difusor

Respecto al ensanchamiento que diferencia al cono de divergencia, se presentará variaciones en la presión, por lo que es resulta ideal que se determine dicha magnitud tanto para la región principal y posterior del difusor.

Presión a la entrada del difusor

El valor de la presión que surge en el área delantera de la cámara de divergencia, corresponde a la misma presión que persiste en la cámara de pruebas, esto significa que $P_{1d} = P_{ts}$, y por tanto la presión principal en el difusor equivale a $P_{2d} = 100889,3781 \text{ Pa} \approx 1008,8938 \text{ hPa}$.

Presión a la salida del difusor

La Ecuación (85) servirá como referencia para determinar la presión que se produce en la segunda sección de la cámara divergente.

Recolección de datos:

Tabla 75

Información para el cálculo de la presión a la salida del difusor

Simbología	Significado	Valor	Unidad
P_{1d}	Presión a la entrada del difusor	100889,3781	Pa
ρ	Densidad del aire	1,1637	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
v_{1d}	Velocidad a la entrada del difusor	25,0000	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
v_{2d}	Velocidad a la salida del difusor	15,2082	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$

Sustitución de valores:

$$P_{2d} = 100889,3781 \text{ Pa} + \frac{1}{2} \cdot 1,1637 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(25 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 - \frac{1}{2} \cdot 1,1637 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(15,2082 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2$$

$$P_{2d} = 101118,4600 \text{ Pa} \approx 1011,1846 \text{ hPa}$$

Variación de presiones por secciones en el difusor

Las presiones resultantes que logren obtenerse en la Tabla 76, son catalogados como P_{2d} , ya que hay que recordar que el flujo se desplaza horizontalmente en todo el sistema, por ende, dicho parámetro es la que presentará variación a medida que se aleje de la presión P_{1d} , que en este caso esta última será calificada como un dato fijo, ante todo lo anterior, se pretende servirse de la Ecuación (85).

Tabla 76

Variación de presiones en relación a un tramo definido en el difusor

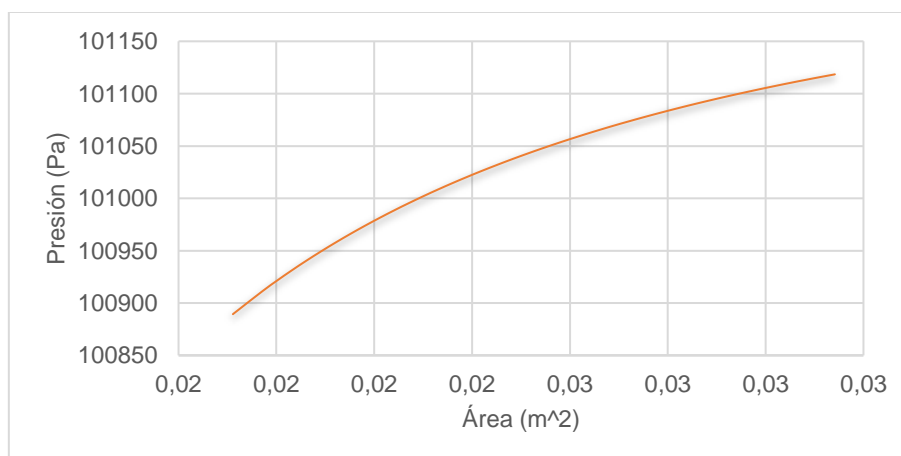
No. de tramo	Presión en la entrada del difusor P_{1d} (Pa)	Densidad del aire ρ ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	Velocidad en la entrada del difusor v_{1d} ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	Velocidad en la salida del difusor v_{2d} ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	Presión en la salida del difusor P_{2d} (Pa)
1	100889,3781	1,1637	25,0000	25,0000	100889,3781
2	100889,3781	1,1637	25,0000	24,2387	100911,1883
3	100889,3781	1,1637	25,0000	23,8752	100921,3649
4	100889,3781	1,1637	25,0000	23,5224	100931,0938
5	100889,3781	1,1637	25,0000	23,1800	100940,4008

6	100889,3781	1,1637	25,0000	22,8473	100949,3099
7	100889,3781	1,1637	25,0000	22,5240	100957,8436
8	100889,3781	1,1637	25,0000	22,2098	100966,0226
9	100889,3781	1,1637	25,0000	21,9042	100973,8664
10	100889,3781	1,1637	25,0000	21,6069	100981,3929
11	100889,3781	1,1637	25,0000	21,3176	100988,6191
12	100889,3781	1,1637	25,0000	21,0359	100995,5608
13	100889,3781	1,1637	25,0000	20,7616	101002,2326
14	100889,3781	1,1637	25,0000	20,4943	101008,6485
15	100889,3781	1,1637	25,0000	20,2338	101014,8212
16	100889,3781	1,1637	25,0000	19,9799	101020,7630
17	100889,3781	1,1637	25,0000	19,7322	101026,4853
18	100889,3781	1,1637	25,0000	19,4907	101031,9987
19	100889,3781	1,1637	25,0000	19,2549	101037,3132
20	100889,3781	1,1637	25,0000	19,0248	101042,4383
21	100889,3781	1,1637	25,0000	18,8001	101047,3830
22	100889,3781	1,1637	25,0000	18,5807	101052,1555
23	100889,3781	1,1637	25,0000	18,3664	101056,7638
24	100889,3781	1,1637	25,0000	18,1569	101061,2153
25	100889,3781	1,1637	25,0000	17,9521	101065,5171
26	100889,3781	1,1637	25,0000	17,7520	101069,6758
27	100889,3781	1,1637	25,0000	17,5562	101073,6976
28	100889,3781	1,1637	25,0000	17,3647	101077,5886
29	100889,3781	1,1637	25,0000	17,1773	101081,3543
30	100889,3781	1,1637	25,0000	16,9940	101085,0000
31	100889,3781	1,1637	25,0000	16,8145	101088,5309
32	100889,3781	1,1637	25,0000	16,6387	101091,9516
33	100889,3781	1,1637	25,0000	16,4666	101095,2667
34	100889,3781	1,1637	25,0000	16,2981	101098,4805
35	100889,3781	1,1637	25,0000	16,1329	101101,5971
36	100889,3781	1,1637	25,0000	15,9711	101104,6204
37	100889,3781	1,1637	25,0000	15,8124	101107,5541
38	100889,3781	1,1637	25,0000	15,6569	101110,4016
39	100889,3781	1,1637	25,0000	15,5044	101113,1663
40	100889,3781	1,1637	25,0000	15,3549	101115,8514
41	100889,3781	1,1637	25,0000	15,2082	101118,4600

Nota. Los datos de la primera sección del difusor, no varían, mientras que los datos de la sección de interés o segunda sección de la cámara, presentan alteraciones progresivas.

Figura 44

Relación de la Presión vs Área en cono divergente



Nota. La representación gráfica en forma de dispersión, considera las distribuciones de áreas seccionadas en el difusor, para ver con notoriedad el progreso de la presión en la cámara.

En adición a lo anterior, se muestra la siguiente tabla, para indicar el crecimiento porcentual de la presión en la sección de divergencia.

Tabla 77

Crecimiento de la presión en el difusor

No. de divisiones	Variación de presiones P_{2d} (Pa)	Presión a la entrada del difusor P_{1d} (Pa)	Diferencia entre presiones $P_{2d} - P_{1d}$ (Pa)	Tasa de crecimiento $\frac{P_{2d} - P_{1d}}{P_{1d}} \cdot 100$ (%)
1	100889,3781	100889,3781	0,0000	0,0000%
2	100911,1883	100889,3781	21,8103	2,1618%
3	100921,3649	100889,3781	31,9869	3,1705%
4	100931,0938	100889,3781	41,7157	4,1348%
5	100940,4008	100889,3781	51,0227	5,0573%
6	100949,3099	100889,3781	59,9318	5,9404%
7	100957,8436	100889,3781	68,4655	6,7862%
8	100966,0226	100889,3781	76,6445	7,5969%
9	100973,8664	100889,3781	84,4883	8,3743%
10	100981,3929	100889,3781	92,0148	9,1204%
11	100988,6191	100889,3781	99,2410	9,8366%
12	100995,5608	100889,3781	106,1827	10,5247%
13	101002,2326	100889,3781	112,8545	11,1860%
14	101008,6485	100889,3781	119,2704	11,8219%
15	101014,8212	100889,3781	125,4431	12,4337%
16	101020,7630	100889,3781	131,3850	13,0227%
17	101026,4853	100889,3781	137,1072	13,5899%
18	101031,9987	100889,3781	142,6206	14,1363%
19	101037,3132	100889,3781	147,9351	14,6631%
20	101042,4383	100889,3781	153,0602	15,1711%
21	101047,3830	100889,3781	158,0049	15,6612%
22	101052,1555	100889,3781	162,7774	16,1342%
23	101056,7638	100889,3781	167,3857	16,5910%
24	101061,2153	100889,3781	171,8372	17,0322%
25	101065,5171	100889,3781	176,1390	17,4586%
26	101069,6758	100889,3781	180,2977	17,8708%
27	101073,6976	100889,3781	184,3195	18,2695%
28	101077,5886	100889,3781	188,2105	18,6551%
29	101081,3543	100889,3781	191,9762	19,0284%
30	101085,0000	100889,3781	195,6219	19,3897%
31	101088,5309	100889,3781	199,1528	19,7397%
32	101091,9516	100889,3781	202,5735	20,0788%
33	101095,2667	100889,3781	205,8886	20,4074%
34	101098,4805	100889,3781	209,1024	20,7259%
35	101101,5971	100889,3781	212,2190	21,0348%
36	101104,6204	100889,3781	215,2423	21,3345%
37	101107,5541	100889,3781	218,1760	21,6253%
38	101110,4016	100889,3781	221,0235	21,9075%
39	101113,1663	100889,3781	223,7882	22,1815%
40	101115,8514	100889,3781	226,4733	22,4477%
41	101118,4600	100889,3781	229,0819	22,7062%

Nota. La presión asciende levemente durante su trayecto al interior el difusor.

5.1.9 Número de Reynolds en las secciones

Número de Reynolds en la cámara de sedimentación

La geometría del ducto de la cámara de decantación resulta ser cuadrada, por lo es elemental emplear la Ecuación (36).

Recolección de los datos:

Antes de emplear la ecuación señalada anteriormente, es necesario definir correspondientemente el valor de la viscosidad absoluta (μ), por lo cual se propone revisar las tablas termodinámicas referidas en la literatura proporcionada por los escritores Çengel y Cimbala (2006), para de tal manera especificar el parámetro en mención que estará delimitada en relación a la temperatura (p. 894).

Tabla 78

Propiedades del aire a una presión de 1 atmósfera

Tabla A-9							
Temperatura T, °C	Densidad ρ , kg/m ³	Calor específico C _p J/kg · K	Conductividad térmica k, W/m · K	Difusividad térmica a, m ² /s	Viscosidad dinámica μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática v, m ² /s	Número de Prandtl Pr
25	1,184	1007	0,02551	2,141×10 ⁻⁵	1,849×10 ^{-5a}	1,562×10 ⁻⁵	0,7296
30	1,164	1007	0,02588	2,208×10 ⁻⁵	1,872×10 ⁻⁵	1,698×10 ⁻⁵	0,7282
35	1,145	1007	0,02625	2,277×10 ⁻⁵	1,895×10 ⁻⁵	1,655×10 ⁻⁵	0,7268

Nota. ^a Corresponde a la condición del aire en función a la temperatura de 30°C a seleccionar para el caso abordado en el presente apartado (ver Anexo 8). Tomado de: (Çengel & Cimbala, 2006, p. 894)

A continuación, se muestra los demás datos requeridos para la utilización de la Ecuación (36).

Tabla 79

Información para el cálculo del número de Reynolds en la cámara de decantación

Simbología	Significado	Valor	Unidad
v _{sc}	Velocidad del aire en la cámara de decantación	4,1667	$\frac{m}{s}$
D _{hsc}	Diámetro hidráulico de la cámara de sedimentación	0,3386	m
ρ	Densidad el aire	1,1637	$\frac{kg}{m^3}$
μ	Viscosidad dinámica del aire	1,8720E-05	$\frac{kg}{m \cdot s}$

Sustitución de valores:

$$Re_{sc} = \frac{4,1667 \frac{m}{s} \cdot 0,3386 m \cdot 1,1637 \frac{kg}{m^3}}{1,8720 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}}$$

$$Re_{sc} = 8,7709 \times 10^4 \approx 87709,3640$$

Número de Reynolds en el panel hexagonal o honeycomb

En este caso, se considera el diámetro hidráulico que presenta una de las celdas del panel, al ser una sección no circular, además se estima que la velocidad que se origina en la cámara de

decantación sea tomada como la velocidad que influye en la el panal de acondicionamiento de flujo.

Recolección de los datos:

Tabla 80

Información para el cálculo del número de Reynolds en la celda del panal

Simbología	Significado	Valor	Unidad
v_{hc}	Velocidad del aire	4,1667	$\frac{m}{s}$
$D_{h_{hc}}$	Diámetro hidráulico de la celda del panal	0,0619	m
ρ	Densidad el aire	1,1637	$\frac{kg}{m^3}$
μ	Viscosidad dinámica del aire	1,8720E-05 ^a	$\frac{kg}{m \cdot s}$

Nota. ^a Valor que consta en la tabla termodinámica A-9 y es seleccionado respecto a la temperatura (ver Tabla 78).

Sustitución de valores:

Al valerse de la Ecuación (36), la misma que hace referencia al número de Reynolds en ductos que discrepan de la geometría de una tubería circular, se obtiene lo siguiente.

$$Re_{hc} = \frac{4,1667 \text{ m/s} \cdot 0,0619 \text{ m} \cdot 1,1637 \text{ kg/m}^3}{1,8720 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}}$$

$$Re_{hc} = 1,6035 \times 10^4 \approx 16034,8544$$

Número de Reynolds en la contracción

Tal como se ha hecho alusión en apartados anteriores, se indica que, de acuerdo a la variabilidad geométrica de la contracción, es importante determinar el comportamiento que se presenta tanto en la zona de entrada y salida de la cámara convergente.

Número de Reynolds a la entrada de la contracción

Debido a la cercanía de la cámara de aceleración con la cámara de estabilización, el número de Reynolds calculado en dicha sección es equivalente a la se suscita en la zona delantera de la contracción. Entonces $Re_{1c} = Re_{sc}$, y su valor adimensional de Reynols corresponde a: $8,7709 \times 10^4 \approx 87709,3640$.

Número de Reynolds a la salida de la contracción

Correspondientemente a que se debe determinar el diámetro hidráulico de la segunda área de la contracción, por evidenciar una apariencia cuadrada, es conveniente utilizar la Ecuación (36):

Recolección de los datos:

Tabla 81

Información para el cálculo del número de Reynolds en la salida de la contracción

Simbología	Significado	Valor	Unidad
v_{2c}	Velocidad a la salida de la contracción	25,0000	$\frac{m}{s}$
$D_{h_{2c}}$	Diámetro hidráulico a la salida de la contracción	0,13824	m
ρ	Densidad del flujo	1,1637	$\frac{kg}{m^3}$
μ	Viscosidad dinámica del flujo	1,8720E-05 ^a	$\frac{kg}{m \cdot s}$

Nota. ^a Representación numérica basada en el criterio de la temperatura según la tabla termodinámica (ver Tabla 78).

Sustitución de valores:

$$Re_{2c} = \frac{25 \text{ m/s} \cdot 0,13824 \text{ m} \cdot 1,1637 \text{ kg/m}^3}{1,8720 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}}$$

$$Re_{2c} = 2,1484 \times 10^5 \approx 214843,1874$$

Número de Reynolds en la cámara de prueba

Al tomar en cuenta que, la sección de ensayo es tipo cuadrangular, se recurre a necesitar de la aplicación de la Ecuación (36).

Recolección de los datos:

Tabla 82

Información para el cálculo del número de Reynolds en la sección de prueba

Simbología	Significado	Valor	Unidad
v_{ts}	Velocidad del aire en la cámara de ensayo	25,0000	$\frac{m}{s}$
$D_{h_{ts}}$	Diámetro hidráulico de la sección	0,1382	m
ρ	Densidad el fluido	1,1637	$\frac{kg}{m^3}$
μ	Viscosidad dinámica del flujo	1,8720E-05 ^a	$\frac{kg}{m \cdot s}$

Nota. ^a Valorización captada de la tabla termodinámica a 1 atm de presión y a una temperatura de 30 °C.

Sustitución de valores:

$$Re_{ts} = \frac{25 \text{ m/s} \cdot 0,1382 \text{ m} \cdot 1,1637 \text{ kg/m}^3}{1,8720 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}}$$

$$Re_{ts} = 2,1484 \times 10^5 \approx 214843,1874$$

El número de Reynolds calculado, representa el valor adimensional que teóricamente pudiese existir en las dos secciones de la cámara de ensayo.

Número de Reynolds en el difusor

De la misma manera que en la cámara de la contracción, se analiza la parte delantera y posterior del difusor, por ser secciones con perfiles geométricos variantes.

Número de Reynolds a la entrada del difusor

Al tener presente que una vez que el flujo llega al límite secundario de la sección de prueba, secuencialmente se traslada a la parte delantera del difusor, por lo que $Re_{1d} = Re_{ts}$, y esto es igual a: $Re_{1d} = 2,1484 \times 10^5 \approx 214843,1874$.

Número de Reynolds a la salida del difusor

En este caso particular y a diferencia de las otras cámaras, la forma de la sección posterior de la cámara divergente, es circular, por lo que se aplica la Ecuación (35).

Recolección de los datos:

Tabla 83

Información para el cálculo del número de Reynolds a la salida del difusor

Simbología	Significado	Valor	Unidad
v_{2d}	Velocidad a la salida del difusor	15,2082	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
D	Diámetro del ventilador	0,2000	m
ρ	Densidad del aire	1,1637	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
μ	Viscosidad dinámica del aire	1,8720E-05 ^a	$\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$

Nota. ^a Expresión relacionada con la determinación de la condición de temperatura (ver Tabla 78).

Sustitución de valores:

$$Re_{2d} = \frac{15,2082 \text{ m/s} \cdot 0,2\text{m} \cdot 1,1637 \text{ kg/m}^3}{1,8720 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}}$$

$$Re_{2d} = 1,8908 \times 10^5 \approx 189079,9857$$

5.1.10 Factor de fricción para el régimen del flujo

Respecto a la Tabla 84, es importante considerarla para definir la rugosidad absoluta (ϵ).

Tabla 84

Rugosidad de la tubería según el tipo de material

Material	Rugosidad ϵ (m)	Rugosidad ϵ (ft)	Condición
Vidrio	0	0	Liso
Plástico	$3,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-6}$	Rugoso
Tubo estirado; cobre, latón, acero	$1,5 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-6}$	Rugoso
Acero, comercial o soldado	$4,6 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-4}$	Rugoso
Hierro galvanizado	$1,5 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-4}$	Rugoso
Hierro dúctil - revestido	$1,2 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-4}$	Rugoso
Hierro dúctil - sin revestir	$2,4 \times 10^{-4}$	$8,0 \times 10^{-4}$	Rugoso
Concreto, bien hecho	$1,2 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-4}$	Rugoso
Acero remachado	$1,8 \times 10^{-3}$	$6,0 \times 10^{-3}$	Rugoso

Nota. La rugosidad es una componente necesaria para el cálculo del factor de fricción en flujos con regímenes turbulentos.

Tomado de: (Mott & Untener, 2015, p. 185)

El material de composición del circuito aerodinámico es a base del plástico o ácido poliláctico PLA (proveniente del término *Polylactic acid* en inglés), por lo que corresponde seleccionar el dato de la segunda fila de la Tabla 84.

Factor de fricción en la cámara de prueba

Se inicia determinado el factor de fricción de Darcy por esta la cámara de ensayo, ya que, en término general, es la sección donde se apunta a estudiar con mayor enfoque el comportamiento del flujo.

Aplicación del método de P.K. Swamee y A.K. Jain – Ecuación (38):

En primer lugar, se determina la rugosidad relativa en la sección de prueba, que según Mott y Untener (2015), se define de la manera siguiente (p. 195).

$$\epsilon_r = \frac{D}{\epsilon} \quad (86)$$

Donde:

D = diámetro de la tubería

ϵ = rugosidad absoluta del material del ducto

En relación a lo anterior, se determina los valores que se muestran a continuación.

Tabla 85*Información para el cálculo de la rugosidad relativa del material*

Simbología	Significado	Valor	Unidad
D_{hts}^a	Diámetro hidráulico de la cámara de ensayo	0,1382	m
ε	Rugosidad del material de la cámara de ensayo	3,0E-07	m

Nota. ^a Por la geometría del ducto (cámara de ensayo), se aplica la condición de diámetro hidráulico.

Al sustituir los datos seleccionados, se obtiene que:

$$\varepsilon_r = \frac{0,1382 \text{ m}}{3,0 \times 10^{-7} \text{ m}}$$

$$\varepsilon_r = 4,6081 \times 10^5 \approx 460810,7438 \text{ m}$$

En conformidad con Mott y Untener (2015), se realiza la siguiente evaluación para verificar la validez de la Ecuación (38), por lo que se establece ciertos rangos en las condiciones a cumplir (p. 195).

Tabla 86*Condición de validez de la ecuación propuesta por Swamee y Jain*

Unidad de análisis	Criterio de evaluación	Valor de la variable	Respuesta evaluativa
Rugosidad de relativa	$D/\varepsilon \geq 100$ $D/\varepsilon \leq 1 \times 10^6$	$4,6081 \times 10^5 \text{ m}$	Se acepta el criterio de evaluación. El valor analizado está dentro del rango propuesto.
Número de Reynolds	$Re \geq 5 \times 10^3$ $Re \leq 1 \times 10^8$	$2,1484 \times 10^5$	Se acepta el criterio evaluativo. El valor analizado está dentro del intervalo de análisis propuesto.

Nota. Los valores de las variables están dentro del límite correspondiente, por la que la ecuación del factor de fricción puede aplicarse.

En base a la estructura de la Ecuación (38), se obtiene los demás datos:

Tabla 87*Información para el cálculo del factor de fricción de la cámara de ensayo*

Simbología	Significado	Valor	Unidad
D_{hts}	Diámetro hidráulico de la cámara de prueba	0,1382	m
ε	Rugosidad del ducto	3,0000E-07	m
Re_{ts}	Número de Reynolds de la cámara de prueba	2,1484E+05	—

Se sustituye los valores correspondientes sobre la formulación.

$$f_{ts} = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 \cdot \left(0,1382 \text{ m} / 3,0 \times 10^{-7} \text{ m} \right)} + \frac{5,74}{(2,1484 \times 10^5)^{0,9}} \right) \right]^2}$$

$$f_{ts} = 1,5338 \times 10^{-2} \approx 0,015338276$$

Aplicación del método de S. E. Haaland – Ecuación (39):

En la Ecuación (39), es conveniente desintegrar la variable del factor de fricción de la raíz cuadrada, obtenido lo siguiente.

$$f = \left\{ \frac{1}{-1,8 \cdot \log \left[\frac{6,9}{\text{Re}} + \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} \right)^{1,11} \right]} \right\}^2 \quad (87)$$

Tomando los datos conocidos en la Tabla 87, se reemplaza las variables en la Ecuación (87), para determinar el factor de fricción por el método 2.

$$f_{ts} = \left\{ \frac{1}{-1,8 \cdot \log \left[\frac{6,9}{2,1484 \times 10^5} + \left(\frac{3,0 \times 10^7 \text{ m} / 0,1382 \text{ m}}{3,7} \right)^{1,11} \right]} \right\}^2$$

$$f_{ts} = 1,5298 \times 10^{-2} \approx 0,015298373$$

Aplicación del método de Colebrook y White – Ecuación (40):

La utilización de este postulado matemático implica necesariamente que asuma un valor para f_n , para lo cual se hace uso del ábaco de Moody, no obstante, a lo igual que en la Ecuación (87), se tiene que realizar una pequeña modificación a la variable del factor de fricción en la Ecuación (40), obteniéndose la expresión:

$$f = \left[\frac{1}{-2 \cdot \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{2,51}{\text{Re} \cdot \sqrt{f'}} \right)} \right]^2 \quad (88)$$

Tabla 88

Interpolación de datos para la determinación del factor de fricción f'

Estructura en x		Estructura en y	
Valor máximo Re	3,0000E+05	Valor máximo f'	0,0250
Valor mínimo Re	2,0000E+05	Valor mínimo f'	0,0240
Valor conocido	2,1484E+05	Valor interpolado f'	2,4148E-02

Nota. En el diagrama de Moody se constata los límites superior e inferior tanto del eje x y del y , para facilitar la interpolación del factor de fricción que asumirá. Tomado de: (Mott & Untener, 2015, p. 186)

La aproximación interpolada para el factor de fricción es de $2,4148 \times 10^{-2} \approx 0,024148432$.

Se considera el valor de f' (recientemente hallado) y se toma también en cuenta los datos mostrados en la Tabla 87, para la sustitución de los mismos en la Ecuación (88).

$$f_{ts} = \left[\frac{1}{-2 \cdot \log_{10} \left(\frac{3,0 \times 10^{-7} \text{ m}}{3,7 \cdot 0,1382 \text{ m}} + \frac{2,51}{2,1484 \times 10^5 \cdot \sqrt{2,4148 \times 10^{-2}}} \right)} \right]^2$$

$$f_{ts} = 1,4724 \times 10^{-2} \approx 0,0147243625$$

Se prevé realizar el proceso anterior para cada una de las iteraciones que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 89

Método iterativo de Newton – Raphson para el valor de fricción

No. de iteración	Factor de fricción asumido f'	Factor de fricción iterado f	Valor residual $f' - f$
1	0,0241484319	0,0147243625	$9,4241 \times 10^{-3}$
2	0,0147243625	0,0155175223	$-7,9316 \times 10^{-4}$
3	0,0155175223	0,0154303412	$8,7181 \times 10^{-5}$
4	0,0154303412	0,0154396672	$-9,3260 \times 10^{-6}$
5	0,0154396672	0,0154386666	$1,0005 \times 10^{-6}$
6	0,0154386666	0,0154387739	$-1,0731 \times 10^{-7}$
7	0,0154387739	0,0154387624	$1,1510 \times 10^{-8}$
8	0,0154387624	0,0154387637	$-1,2345 \times 10^{-9}$
9	0,0154387637	0,0154387635	$1,3240 \times 10^{-10}$
10	0,0154387635	0,0154387635	$-1,4201 \times 10^{-11}$
11	0,0154387635	0,0154387635	$1,5232 \times 10^{-12}$
12	0,0154387635	0,0154387635	$-1,6337 \times 10^{-13}$
13	0,0154387635	0,0154387635	$1,7522 \times 10^{-14}$
14	0,0154387635	0,0154387635	$-1,8804 \times 10^{-15}$
15	0,0154387635	0,0154387635	$2,0296 \times 10^{-16}$
16	0,0154387635	0,0154387635	$-2,0817 \times 10^{-17}$
17	0,0154387635	0,0154387635	$0,0000 \times 10^0$
18	0,0154387635	0,0154387635	$0,0000 \times 10^0$
19	0,0154387635	0,0154387635	$0,0000 \times 10^0$
20	0,0154387635	0,0154387635	$0,0000 \times 10^0$

Nota. La selección del factor de fricción por el método iterativo, implica equiparar varias componentes de la parte decimal, para obtener un resultado más preciso.

Respecto a la Tabla 89, se visualiza que en la iteración #9, es donde se produce una de las mayores aproximaciones entre el factor de fricción asumido (f') y el factor de fricción iterado (f), sin embargo, no es hasta la iteración #17, en la que se cumple la condición de $f' - f \cong 0$, es decir, tanto el valor asumido y el resultado obtenido producto de la iteración, son idénticos.

Tabla 90

Comparativa entre métodos para hallar el factor de fricción

	Método	Resultado de f_{ts}	Diferencia entre métodos			Promedio entre métodos $\bar{X} = \frac{\sum X}{n}$
			Método 1 - 2	Método 1 - 3	Método 2 - 3	
1	P. K. Swamee y A. K. Jain	0,0153382765				
2	S. E. Haaland	0,0152983726	0,0040%	0,0100%	0,0100%	0,0153584709
3	Colebrook – White	0,0154387635				

Nota. Los métodos implementados para calcular f_{ts} , presentan una gran similitud numérica entre sí.

Factor de fricción en la cámara de estabilización

Debido a que el método de Colebrook – White conlleva intrínsecamente a ejercer un proceso iterativo, la misma que podría resultar un poco tediosa en realizarla, se usará en las demás secciones del sistema, el método proporcionado por el profesor del Instituto Noruego de Tecnología, S. E. Haaland, que según Çengel y Cimbala (2006), este postulado genera un el cálculo directo y adecuada aproximación del factor de fricción de Darcy – Weisbach (p. 341).

Recolección de los datos:

Tabla 91

Información para el cálculo del factor de fricción en la sección de decantación

Simbología	Significado	Valor	Unidad
ϵ	Rugosidad del ducto	3,0000E-07	m
D_{hsc}	Diámetro hidráulico de la cámara de decantación	0,3386	m
Re_{sc}	Número de Reynolds de la cámara de decantación	8,7709E+04	–

Nota. La rugosidad corresponde a la del material que recubre las paredes de la sección (plástico).

Sustitución de valores:

$$f_{sc} = \left\{ \frac{1}{-1,8 \cdot \log \left[\frac{6,9}{8,7709 \times 10^4} + \left(\frac{3,0 \times 10^7 \text{ m} / 0,3386 \text{ m}}{3,7} \right)^{1,11} \right]} \right\}^2$$

$$f_{sc} = 1,8325 \times 10^{-2} \approx 0,01831529$$

Factor de fricción en el panel

Recolección de los valores:

Tabla 92

Información para el cálculo del factor de fricción en el panel

Simbología	Significado	Valor	Unidad
ε	Rugosidad del material del panel	3,0000E-07	m
D_{hc}	Diámetro hidráulico de la celda del panel	0,0619	m
Re_{sc}	Número de Reynolds en la celda del panel	1,6035E+04	–

Nota. La composición del panel hexagonal, corresponde al material PLA.

Sustitución de valores:

$$f_{hc} = \left\{ \frac{1}{-1,8 \cdot \log \left[\frac{6,9}{1,6035 \times 10^4} + \left(\frac{3,0 \times 10^7 \text{ m} / 0,0619 \text{ m}}{3,7} \right)^{1,11} \right]} \right\}^2$$

$$f_{hc} = 2,7243 \times 10^{-2} \approx 0,02724256$$

Factor de fricción en la contracción

Factor de fricción a la entrada de la contracción

Este parámetro, será el mismo respecto a la que denota la salida de la cámara de estabilización, por lo que el factor de fricción en la zona delantera de la cámara de convergencia es: $f_{1c} = 1,8325 \times 10^{-2} \approx 0,01832529$.

Factor de fricción a la salida de la contracción

Se asume el factor de fricción determinado en la cámara de ensayo, dando como resultado que el factor de fricción a la salida de la contracción corresponde a: $f_{2c} = 1,5298 \times 10^{-2} \approx 0,01529837$.

Factor de fricción en el difusor

Factor de fricción a la entrada del difusor

El valor de este tipo de factor, puede adjudicarse al valor calculado en la sección de prueba, por lo cual se indica que el factor de Darcy en la región principal del cono de divergencia, equivale a: $f_{1d} = 1,5298 \times 10^{-2} \approx 0,01522837$.

Factor de fricción a la salida del difusor

De acuerdo a determinar el factor f en la sección final del difusor se obtiene lo siguiente.

Recolección de los datos:

Tabla 93

Información para el cálculo del factor de fricción a la salida del difusor

Simbología	Significado	Valor	Unidad
ε	Rugosidad de la tubería	3,0000E-07 ^a	m
D	Diámetro del ventilador	0,2000	m
Re_{2d}	Número de Reynolds a la salida del difusor	1,8908E+05	—

Nota. ^a El difusor estará fabricado completamente de material de plástico.

Sustitución de valores:

Se reemplaza los datos presentados en la Tabla 93 sobre la Ecuación (87), por lo que se determina que:

$$f_{sc} = \left\{ \frac{1}{-1,8 \cdot \log \left[\frac{6,9}{1,8908 \times 10^5} + \left(\frac{3,0 \times 10^7 \text{ m} / 0,2 \text{ m}}{3,7} \right)^{1,11} \right]} \right\}^2$$

$$f_{sc} = 1,5298 \times 10^{-2} \approx 0,01529837$$

5.1.11 Estudio de las pérdidas en el sistema

Para el cálculo de las pérdidas por fricción, se tiene que tener presente como primer paso ejercer la caracterización del régimen del flujo, sea este laminar o turbulento, y que es dependiente del resultado que sea determinado en base al número de Reynolds (Mott & Untener, 2015, p. 178).

En el presente apartado, se trata de determinar las pérdidas producto de la fricción de las partículas de aire con las paredes de las componentes del circuito del túnel de viento, cuando el flujo se encuentra en desplazamiento longitudinal.

Coeficientes de pérdidas

Se presentará más adelante, las diferentes formulaciones aportadas por los investigadores del ámbito que se está abordando en la presente documentación, para hallar el coeficiente de pérdida de acuerdo a las cualidades de la sección en que la fluye el flujo.

Coeficiente de pérdida en la cámara de decantación

Según el investigador Daly (1992), alude que la estimación del factor de pérdida en la cámara de enderezamiento de flujo, está determinada las fórmulas que se adjuntan a continuación, en la que su elección depende de la particularidad de la geometría del ducto sobre la cual se desplaza la masa de aire (p. 88).

$$K_{sc} = 0,02 \cdot \frac{L}{D} \rightarrow \text{Para ductos cilíndricos} \quad (89)$$

Donde:

K_{sc} = coeficiente de pérdida en la cámara de sedimentación

L = longitud de la cámara

D = diámetro de la tubería

$$K_{sc} = 0,01 \cdot \frac{L \cdot (A + B)}{A \cdot B} \rightarrow \text{Para ductos rectangulares} \quad (90)$$

Donde:

K_{sc} = coeficiente de pérdida de la cámara de estabilización

L = extensión longitudinal de la cámara

A = lado 1 de la tubería

B = lado 2 de la tubería

Reestructuración de la Ecuación (90):

De acuerdo a que, para el presente caso, la cámara de sedimentación ha demostrado ser de geometría cuadrada, se realiza una mínima simplificación en las variables de la ecuación revelada con antelación.

$$K_{sc} = 0,01 \cdot \frac{L \cdot (a + a)}{a^2} \rightarrow \text{Para ductos cuadrados} \quad (91)$$

Donde:

K_{sc} = coeficiente de pérdida adimensional

L = largo de la cámara

a = uno de los lados del ducto

Recolección de los datos:

Tabla 94

Información para el cálculo del coeficiente de pérdida

Simbología	Significado	Valor	Unidad
L_{sc}	Longitud de la cámara de estabilización	0,3714	m
a	Lado del área de la cámara de estabilización	0,338625	m

Nota. La cámara de decantación posee secciones cuadradas, por lo que se necesita definir solamente la dimensión de un lado en función a la Ecuación (91).

Sustitución de valores:

$$K_{sc} = 0,01 \cdot \frac{0,3714 \text{ m} \cdot (0,3386 \text{ m} + 0,3386 \text{ m})}{(0,3386 \text{ m})^2}$$

$$K_{sc} = 0,0219$$

Coefficiente de pérdida en el panel

Antes de obtener el coeficiente de pérdida del panel (K_{Lh}), es de consideración localizar el coeficiente de fricción del cuerpo del panel (λ_h), que, según Barlow et al. (1999), este parámetro presenta dos distinciones, las mismas que están determinadas en concordancia con el número de Reynolds (p. 91).

$$\lambda_h = 0,375 \cdot \left(\frac{\Delta}{D_h}\right)^{0,4} \cdot Re^{-0,1} \Rightarrow \text{para } Re \leq 275 \quad (92)$$

Donde:

Δ = rugosidad del material

D_h = diámetro del panel

Re = número de Reynolds

$$\lambda_h = 0,214 \cdot \left(\frac{\Delta}{D_h}\right)^{0,4} \Rightarrow \text{para Re} > 275 \quad (93)$$

Donde:

Δ = rugosidad del material

D_h = diámetro del panel

Debido a que el número de Reynolds determinado en la celda del panel, posee un régimen turbulento, se emplea la Ecuación (93), por lo que se considera la siguiente tabla de datos:

Tabla 95

Información para el cálculo del coeficiente de fricción del cuerpo del panel

Simbología	Significado	Valor	Unidad
Δ	Rugosidad del material del panel	3,0000E-07	m
D_{hnc}^a	Diámetro hidráulico de la celda del panel	0,0619	m

Nota. ^a La geometría de la celda del panel es hexagonal, por lo que se recurre a establecer su diámetro hidráulico.

Se reemplaza los valores establecidos en la Ecuación (93).

$$\lambda_h = 0,214 \cdot \left(\frac{3,0 \times 10^{-7}}{0,0619 \text{ m}}\right)^{0,4}$$

$$\lambda_h = 0,0016$$

Una vez que haya conocido el coeficiente λ_h , se utiliza la siguiente expresión para determinar el coeficiente de pérdida a través de los panales (Barlow et al., 1999, p. 90).

$$K_h = \lambda_h \cdot \left(\frac{L_h}{D_h} + 3\right) \cdot \left(\frac{1}{\beta_h}\right)^2 + \left(\frac{1}{\beta_h} - 1\right)^2 \quad (94)$$

Donde:

K_h = coeficiente de pérdida del panel

λ_h = coeficiente de fricción del cuerpo del panel

D_h = diámetro del panel

L_h = longitud del panel

β_h = porosidad del panel

Previo a calcular el coeficiente de pérdida total en el honeycomb, se registra los datos presentados en la Tabla 96.

Tabla 96

Información para el cálculo del coeficiente de pérdida del panal

Simbología	Significado	Valor	Unidad
λ_h	Coefficiente de fricción del cuerpo del honeycomb	0,0016	–
L_h	Dimensión longitud del honeycomb	0,3714	m
D_{hhc}	Diámetro hidráulico del honeycomb	0,0619	m
β_h	Porosidad del honeycomb	0,9971 ^a	–

Nota. ^aLa porosidad de un panal tendrá que contar con un valor adimensional igual o mayor a 0,85.

Mediante la sustitución de los valores que han sido señalados con anterioridad, se consigue que:

$$K_h = 0,0016 \cdot \left(\frac{0,3714 \text{ m}}{0,0619 \text{ m}} + 3 \right) \cdot \left(\frac{1}{0,9971} \right)^2 + \left(\frac{1}{0,9971} - 1 \right)^2$$

$$K_h = 0,0145$$

Coefficiente de fricción de la contracción

Para encontrar el coeficiente de fricción en la cámara convergente, se requiere primero calcular el coeficiente del factor de fricción promedio, que es obtenida a partir de la media entre los coeficientes de f de la sección de entrada y salida de la contracción (Neriya Hegade et al., 2020, p. 6).

$$f_{av} = \left\{ \left(\frac{1}{2} \right) \cdot (f_{inlet} + f_{outlet}) \right\} \quad (95)$$

Donde:

f_{av} = coeficiente del factor de fricción promedio

f_{inlet} = factor de fricción en la entrada de la contracción

f_{outlet} = factor de fricción a la salida de la contracción

En base a lo anterior se considera los siguientes valores:

Tabla 97

Información para el cálculo del coeficiente del factor de fricción promedio

Simbología	Significado	Valor	Unidad
f_{inlet}	Factor de fricción en la región delantera de la tobera	1,8325E-02	–
f_{outlet}	Factor de fricción en la región posterior de la tobera	1,5298E-02	–

Nota. El promedio del factor de fricción es ejecutado a razón de la geometría variada de la contracción.

Por medio de la sustitución de valores, se halla el valor de f_{av} , por lo tanto, se obtiene que:

$$f_{av} = \left\{ \left(\frac{1}{2} \right) \cdot (1,8213 \times 10^{-2} + 1,5213 \times 10^{-2}) \right\}$$

$$f_{av} = 1,6713 \times 10^{-2}$$

De acuerdo con Barlow et al., el coeficiente total de pérdida de la sección de convergencia, es resuelta por la fórmula expresada como (p. 98):

$$K_c = 0,32 \cdot f_{av} \cdot \frac{L_c}{D_{hc}} \quad (96)$$

Donde:

K_c = coeficiente de pérdida de la contracción

f_{av} = factor de fricción promedio

L_c = longitud de la contracción

D_{hc} = diámetro hidráulico de la contracción

Al conocer la forma en como está organizada la ecuación mostrada con antelación, se procede a adjuntar los datos siguientes:

Tabla 98

Información para el cálculo del coeficiente de pérdida de la contracción

Simbología	Significado	Valor	Unidad
f_{av}	Coficiente de fricción promedio	1,6812E-02	–
L_c	Longitud de la tobera convergente	0,3386	m
D_{hc}^a	Diámetro hidráulico a la salida de la cámara	0,1382	m ²

Nota. ^aLa contracción es una componente con una tubería no circular, por lo que se introduce el factor del diámetro hidráulico de dicha cámara, que en este caso está direccionada a la segunda región de la misma, debido a que, en aquel lugar, es donde se produce la mayor velocidad del flujo.

A continuación, se efectúa la suplantación de valores en el Ecuación (96).

$$K_c = 0,32 \cdot 1,6713 \times 10^{-2} \cdot \frac{0,3386 \text{ m}}{0,1382 \text{ m}^2}$$

$$K_c = 0,0131$$

Coficiente de pérdida de la sección de prueba

De acuerdo con Barlow et al. (1999), el coeficiente de pérdida de la cámara de ensayo, es determinada en base a la siguiente relación (p. 75):

$$K_{ts} = f_{ts} \cdot \frac{L_{ts}}{D_{ts}} \quad (97)$$

Donde:

K_{ts} = coeficiente de pérdida de la cámara de prueba

f = factor de fricción de la sección de prueba

L = longitud de la sección de ensayo

D_{ts} = diámetro de la cámara de prueba

Recolección de los datos:

Tabla 99

Información para el cálculo del coeficiente de pérdida de la sección de prueba

Simbología	Significado	Valor	Unidad
f_{ts}	Factor de fricción de la sección de ensayo	1,5353E-02	–
L_{ts}	Longitud de la sección de prueba	0,4147	m
$D_{h_{ts}}^a$	Diámetro hidráulico de la cámara	0,1382	m

Nota. ^a Respecto a la apariencia cuadrangular de la sección de ensayo, se atribuye la condición de diámetro hidráulico.

Sustitución de valores:

$$K_{ts} = 1,5353 \times 10^{-2} \cdot \frac{0,4147 \text{ m}}{0,1382 \text{ m}}$$

$$K_{ts} = 0,0461$$

Coeficiente de pérdida en el difusor

En primer lugar, se considera emplear el mismo criterio que consta en la Ecuación (95), la cual consiste en obtener el valor promedio entre los factores de fricción correspondientes a las regiones de entrada y salida de la cámara de divergencia. Por tanto, se indica que: $f_{av_d} = 1,5402 \times 10^{-2} \approx 0,01540168$.

La literatura proporcionada por Barlow et al. (1999), indica que la relación de área (A_R), se constituye como una de las componentes necesarias para poder hallar el coeficiente de fricción del cuerpo del difusor (K_f). En consideración a que, la relación de área resulta de la razón entre la segunda área y la primera área del cono divergente, se obtiene la expresión siguiente (p. 80):

$$A_R = \frac{A_2}{A_1} \quad (98)$$

Donde:

A_R = relación entre áreas del difusor

A_1 = área de la sección delantera de la cámara divergente

A_2 = área de la sección posterior de la cámara divergente

El área A_2 presenta una geometría circular con $0,0314 \text{ m}^2$ (obtenida a partir del diámetro del ventilador, donde su área es igual a $A_2 = \pi \cdot D^2/4$) y el área A_1 cuenta con una geometría cuadrada de $0,0191 \text{ m}^2$, por tanto, la relación entre las secciones del difusor tiene un valor no dimensional de 1,6438.

A continuación, se pone en manifiesto la formulación enunciada por Barlow et. al. (1999), la cual conlleva a calcular el coeficiente de fricción del cuerpo del cono de desaceleración (p. 82).

$$K_f = \left(1 - \frac{1}{A_R^2}\right) \cdot \frac{f}{8 \cdot \sin \theta} \quad (99)$$

Donde:

K_f = coeficiente de fricción del cuerpo del difusor

A_R = relación entre las áreas del difusor

f = factor de fricción

θ = ángulo cónico de expansión de semi – extensión

Para dar resolutive a la ecuación anterior, se toma en cuenta los datos que se adhiere en la Tabla 100.

Tabla 100

Información para el cálculo del coeficiente de fricción del cuerpo del difusor

Simbología	Significado	Valor	Unidad
A_R	Relación del área de salida y entrada	1,6438	–
f_{avd}	Factor de fricción promedio del difusor	1,5488E-02	–
θ_e	Ángulo de semi – apertura	3,5000	°

Acto seguido, se realiza el remplazo de los datos citados anteriormente, en la Ecuación (99).

$$K_f = \left(1 - \frac{1}{(1,6438)^2}\right) \cdot \frac{1,5402 \times 10^{-2}}{8 \cdot \sin(3,50^\circ)}$$

$$K_f = 0,0199$$

Barlow et al. (1999), señala que es fundamental que se halle el factor de pérdida de acuerdo a la geometría de la sección transversal de la cámara de divergencia, para esto se presenta dos

variantes muy comunes, que a su vez estarán dispuestas en función al número de grados de semi – apertura que posea el ángulo de expansión (p. 82).

$$K_{e_{\text{circle}}} = \begin{cases} 0,1033 - 0,023890 \rightarrow \text{para } 0^\circ < \theta_e < 1,5^\circ; \\ 0,1709 - 0,11700 + 0,03260 \cdot \theta_e^2 + 0,001078 \cdot \theta_e^3 - \\ 0,0009076 \cdot \theta_e^4 - 0,00001331 \cdot \theta_e^5 + 0,00001345 \cdot \theta_e^6 \rightarrow \\ \text{para } 1,5^\circ \leq \theta_e \leq 5^\circ; \\ -0,09661 + 0,046728 \rightarrow \text{para } 5^\circ < \theta_e \end{cases} \quad (100)$$

Donde:

$K_{e_{\text{circle}}}$ = coeficiente de factor de pérdida del difusor con sección geométrica circular

θ_e = ángulo de expansión del difusor

$$K_{e_{\text{square}}} = \begin{cases} 0,09623 - 0,0041520 \rightarrow \text{para } 0^\circ < \theta_e < 1,5^\circ; \\ 0,1222 - 0,045900 + 0,02203 \cdot \theta_e^2 + 0,003269 \cdot \theta_e^3 - \\ 0,0006145 \cdot \theta_e^4 - 0,00002800 \cdot \theta_e^5 + 0,00002337 \cdot \theta_e^6 \rightarrow \\ \text{para } 1,5^\circ \leq \theta_e \leq 5^\circ; \\ -0,01322 + 0,058660 \rightarrow \text{para } 5^\circ < \theta_e \end{cases} \quad (101)$$

Donde:

$K_{e_{\text{square}}}$ = coeficiente de factor de pérdida del difusor con sección geométrica cuadrada

θ_e = ángulo cónico de ampliación del difusor

Debido a que, la cámara de desaceleración tiene un aspecto variado respecto a su zona superior e inferior, se considera desarrollar tanto la Ecuación (100), como también la Ecuación (101).

La primera sección del cono divergente tiene un coeficiente del factor de pérdida igual a: $K_e = 0,4224$.

La segunda sección del difusor presenta un coeficiente del factor de pérdida, que corresponde a: $K_e = 0,0885$.

Por tanto, el coeficiente del factor de pérdida total se representa como $K_{ex} = K_{e_{\text{square}}} + K_{e_{\text{circle}}}$, lo que da como resultado que: $K_{ex} = 0,2554$.

Posteriormente, se realiza una sumatoria entre el coeficiente de fricción del cuerpo y el coeficiente del factor de pérdida del difusor, obteniéndose la expresión siguiente (Barlow et al., 1999, p. 82):

$$K_d = K_f + K_{ex} \quad (102)$$

Donde:

K_d = coeficiente de expansión

K_f = coeficiente de fricción del cuerpo del difusor

K_{ex} = coeficiente del factor de pérdida en función a las secciones transversal del difusor

Al sustituir las variables señaladas en la Ecuación (102), se determina que: $K_d = 0,0199 + 0,2554$, y esto es igual a $K_d = 0,2753$.

Pérdidas en las secciones

Pérdida en la cámara de sedimentación

Recolección de los datos:

Tabla 101

Información para el cálculo del coeficiente de pérdida de la sección de decantación

Simbología	Significado	Valor	Unidad
f_{sc}	Factor de fricción en la cámara de sedimentación	1,8325E-02	—
L_{sc}	Longitud de la cámara de estabilización	0,3714	m
D_{hsc}	Diámetro hidráulico de la cámara de la sedimentación	0,3386	m
K_{sc}	Coficiente de pérdida en la cámara de decantación	0,0219	—
v_{sc}	Velocidad en la cámara de sedimentación	4,1667 ^a	$\frac{m}{s}$
g	Fuerza gravitatoria	9,80665	$\frac{m}{s^2}$

Nota. ^a Asimila la velocidad promedio en la cámara de decantación.

Sustitución de valores:

Al reemplazar los datos estipulados en la Tabla 101 sobre la Ecuación (43), se logra obtener que:

$$h_{L_{sc}} = \left(1,8325 \times 10^{-2} \cdot \frac{0,3714 \text{ m}}{0,3386 \text{ m}} + 0,0219 \right) \cdot \frac{(4,1667 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,80665 \text{ m/s}^2}$$

$$h_{L_{sc}} = 0,0372 \text{ m}$$

Pérdida en el panal

Recolección de los datos:

Tabla 102

Información para el cálculo de la pérdida por fricción en el honeycomb

Simbología	Significado	Valor	Unidad
f_{hc}	Factor de fricción en la celda del panel	2,7243E-02	–
L_h	Espesor del panel en dirección al flujo	0,3714	m
$D_{h_{hc}}$	Diámetro hidráulico de la celda del panel	0,0619	m
K_h	Coefficiente de pérdida del panel	0,0145	–
v_{hc}^a	Velocidad sobre la celda del panel	4,1667	$\frac{m}{s}$
g	Fuerza de atracción gravitacional	9,80665	$\frac{m}{s^2}$

Nota. Representa a la velocidad existente a lo largo de la cámara de decantación.

Sustitución de valores:

Se realiza el reemplazo de los valores respectivos en la Ecuación (43), para hallar la pérdida por efecto de la fricción en el panel hexagonal.

$$h_{L_h} = \left(2,7243 \times 10^{-2} \cdot \frac{0,3714 \text{ m}}{0,0619 \text{ m}} + 0,0145 \right) \cdot \frac{(4,1667 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,80665 \text{ m/s}^2}$$

$$h_{L_h} = 0,1575 \text{ m}$$

Pérdida en la contracción

Recolección de los datos:

Para la determinación de la pérdida total en la sección de convergencia, se presenta como datos lo siguiente:

Tabla 103

Información para el cálculo de la pérdida en la contracción

Simbología	Significado	Valor	Unidad
f_{av}	Factor de fricción promedio en la contracción	1,6812E-02	–
L_c	Longitud del cono convergente	0,3386	m
$D_{h_{2c}}^a$	Diámetro hidráulico a la salida de la cámara	0,1382	m ²
K_c	Coefficiente de pérdida de la contracción	0,0132	–
v_{2c}^b	Velocidad a la salida de la contracción	25,0000	$\frac{m}{s}$
g	Fuerza por efecto de gravitación	9,80665	$\frac{m}{s^2}$

Nota. ^a Relaciona a la sección donde se genera la mayor velocidad. ^b Se considera la velocidad máxima local del sistema.

Sustitución de valores:

Luego de determinar la información correspondiente, se prosigue con el reemplazo de aquellos datos en la Ecuación (43).

$$h_{L_c} = \left(1,6812 \times 10^{-2} \cdot \frac{0,3386 \text{ m}}{0,1382 \text{ m}^2} + 0,0131 \right) \cdot \frac{(25 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,80665 \text{ m/s}^2}$$

$$h_{L_c} = 1,7322 \text{ m}$$

Pérdida en la cámara de prueba

Recolección de los datos:

Tabla 104

Información para el cálculo de la pérdida total en la sección de prueba

Simbología	Significado	Valor	Unidad
f_{ts}	Factor de fricción de la cámara de prueba	1,5298E-02	—
L_{ts}	Longitud de la sección de prueba	0,4147	m
$D_{h_{ts}}$	Diámetro hidráulico de la cámara de ensayo	0,1382	m ²
K_{ts}	Coefficiente de pérdida de la sección de prueba	0,0461	—
v^a	Velocidad en la sección de ensayo	25,0000	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
g	Fuerza de atracción gravitacional	9,80665	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Nota. ^aRelaciona la velocidad local de mayor afluencia en toda el área de prueba.

Sustitución de valores:

Al emplear la Ecuación (43), se consigue hallar lo siguiente:

$$h_{L_{ts}} = \left(1,5298 \times 10^{-2} \cdot \frac{0,4147 \text{ m}}{0,1382 \text{ m}} + 0,0461 \right) \cdot \frac{(25 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,80665 \text{ m/s}^2}$$

$$h_{L_{ts}} = 2,9302 \text{ m}$$

Pérdida en el difusor

Son el tipo de pérdida de mayor incidencia en el circuito y de la cual se debe dar mayor consideración, dado a que es la cámara más cercana a la sección donde se aloja el equipo de aspirado o ventilador.

Recolección de los valores:

Tabla 105*Información para el cálculo de la pérdida total en el difusor*

Simbología	Significado	Valor	Unidad
f_{avd}	Factor de fricción promedio entre las secciones del difusor	1,5488E-02	–
L_d	Longitud de la cámara de divergencia	0,5049	m
$D_{h_{2d}}^a$	Diámetro hidráulico a la salida de la cámara de desaceleración	0,2000	m
K_d	Coefficiente de pérdida de expansión del difusor	0,2754	–
v_{2d}^b	Velocidad a la salida de la cámara de desaceleración	15,2082	$\frac{m}{s}$
g	Fuerza de atracción gravitatoria	9,80665	$\frac{m}{s^2}$

Nota. ^a La región del difusor con forma de diámetro del ventilador, es considerada, debido a que es la última sección donde fluirá el fluido, previo a la aspiración del flujo.

^b Equivale a la velocidad crítica en el cono divergente.

Sustitución de valores:

Se emplea la sustitución pertinente de la información señalada con anticipación sobre la Ecuación (43).

$$h_{L_d} = \left(1,5488 \times 10^{-2} \cdot \frac{0,5049 \text{ m}}{0,20 \text{ m}} + 0,2753 \right) \cdot \frac{(15,2082 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,80665 \text{ m/s}^2}$$

$$h_{L_d} = 3,7089 \text{ m}$$

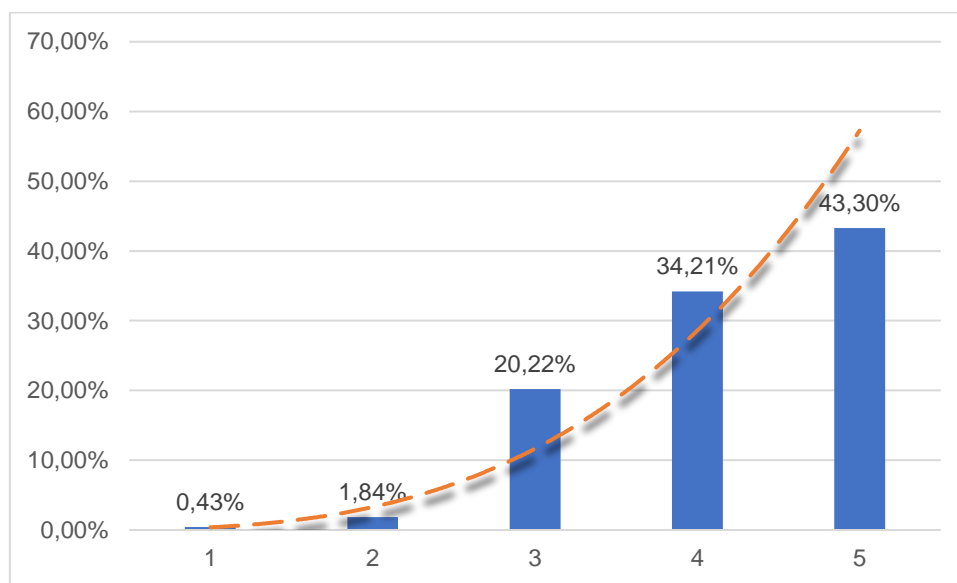
Pérdidas totales en el circuito

Finalizada la determinación de cada una de las pérdidas de las partes elementales del túnel aerodinámico, se realiza una comparativa en cuanto a la repercusión que puedan tener estas en el circuito.

Tabla 106*Pérdidas totales en el túnel de viento*

	Sección	Representación simbólica	Valorización de la pérdida de fricción (m)	Porcentaje de incidencia (%)
1	Pérdida en la cámara de sedimentación	$h_{L_{sc}}$	0,0372	0,43%
2	Pérdida en el panel	h_{L_h}	0,1575	1,84%
3	Pérdida en la contracción	h_{L_c}	1,7322	20,22%
4	Pérdida en la cámara de prueba	$h_{L_{ts}}$	2,9302	34,21%
5	Pérdida en el difusor	h_{L_d}	3,7089	43,30%
Total	—	—	8,5660	100,00%

Nota. La tabla compara la participación de las pérdidas por fricción, en cada una de las componentes del circuito.

Figura 45*Pérdidas del circuito*

Nota. Las pérdidas o cargas por fricción a través de las secciones, arrojan visualmente un crecimiento exponencial.

5.1.12 Razón de flujo de masa en la cámara de pruebas

Por medio del desarrollo de la Ecuación (44), se obtiene el flujo másico en la sección de ensayos.

Recolección de los datos:

Tabla 107*Información para el cálculo del flujo másico de la sección de ensayo*

Simbología	Significado	Valor	Unidad
ρ	Densidad del gas ideal	1,1637	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
A_{ts}	Área transversal de la cámara de pruebas	0,0191	m^2
v_{ts}	Velocidad en la cámara de ensayo	25	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$

Sustitución de valores:

$$\dot{m} = 1,1637 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,0191 \text{ m}^2 \cdot 25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\dot{m} = 0,5560 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

5.1.13 Flujo volumétrico en la cámara de pruebas

Se considera la Ecuación (45), para hallar el caudal volumétrico de la presente cámara.

*Recolección de los datos:***Tabla 108***Información para el cálculo del gasto volumétrico*

Simbología	Significado	Valor	Unidad
\dot{m}	Flujo másico	0,5560	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
ρ	Densidad el gas	1,1637	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Sustitución de valores:

$$\dot{V} = \frac{0,5560 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1,1637 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\dot{V} = 0,4778 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

5.1.14 Potencia requerida en el circuito aerodinámico

Por medio de la aplicación de la Ecuación (46), se obtiene valores aproximados respecto a la potencia que en teoría debería suministrar el ventilador, para que las condiciones y la velocidad propuesta en el diseño, puedan generarse en el sistema.

Recolección de los datos:

Tabla 109*Información para el cálculo de la potencia de suministro del ventilador*

Simbología	Significado	Valor	Unidad
ρ	Densidad del fluido	1,1637	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
g	Fuerza de la gravedad	9,80665	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
\dot{V}	Gasto volumétrico	0,4778	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
$h_{L_{\text{total}}}$	Carga por fricción total en el circuito	8,5660	m

Nota. Se toma en consideración las pérdidas generadas por las primeras cuatro secciones principales del túnel de viento, más la pérdida provocada por el panel.

Sustitución de valores:

$$P = 1,1637 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,4478 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 8,5660 \text{ m}$$

$$P = 46,7057 \text{ Watts} \approx 0,0626 \text{ HP}$$

Es importante tomar en cuenta que, en todo caso se debe agregar un 20% más de potencia al valor obtenido anteriormente, esto debido a la posible ocurrencia de alguna pérdida en la eficiencia energética del dispositivo, por lo que se necesitaría alrededor de 56,0468 Watts \approx 0,0752 HP.

CAPÍTULO VI. ANÁLISIS Y RESULTADOS

6.1 Relación de magnitudes: presión y velocidad

Una vez que se ha precisado en los incisos anteriores, las distribuciones de presión y de velocidad en relación a un punto en específico, se puede acoplar dichas magnitudes para tener una noción de su interacción al interior de una sección. Para este caso puntual, se colocará atención solamente en las cámaras de los conos de convergencia y divergencia, ya que son dos componentes donde suceden variaciones considerables en los parámetros antes indicados.

6.1.1 Contracción

Se considera la información que se detalla en la Tabla 110, para la creación de la Figura 46.

Tabla 110

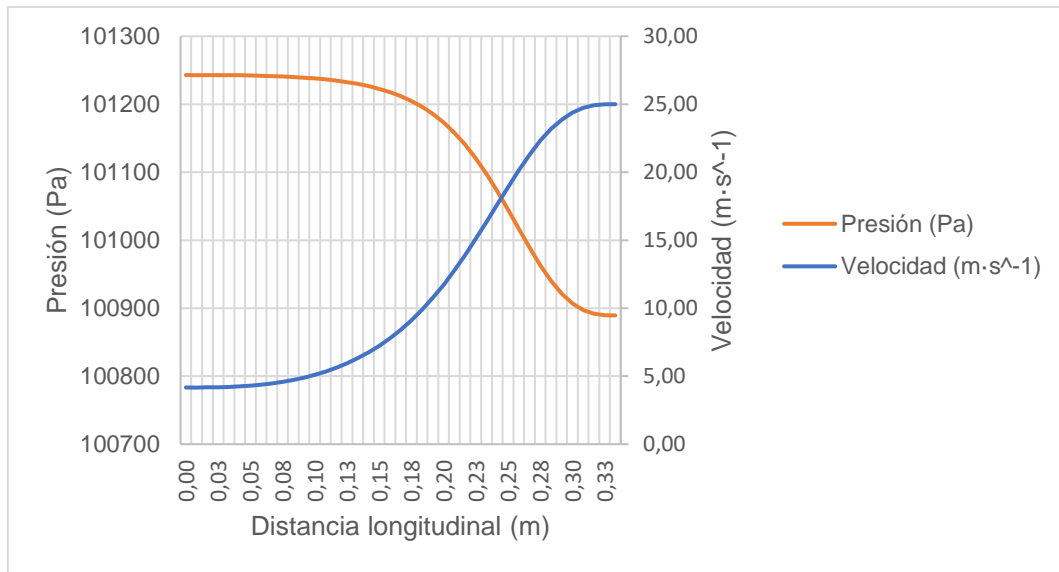
Datos para la relación de la gráfica presión, velocidad y distancia en la contracción

No. de fragmentación en la sección	Distancia longitudinal L_c (m)	Presión P_c (Pa)	Velocidad v_c (m/s)
1	0,0000	101242,9348	4,1667
2	0,0085	101242,9312	4,1674
3	0,0169	101242,9071	4,1724
4	0,0254	101242,8445	4,1853
5	0,0339	101242,7275	4,2092
6	0,0423	101242,5417	4,2470
7	0,0508	101242,2727	4,3011
8	0,0593	101241,9053	4,3739
9	0,0677	101241,4226	4,4677
10	0,0762	101240,805	4,5849
11	0,0847	101240,0287	4,7282
12	0,0931	101239,0647	4,9003
13	0,1016	101237,877	5,1043
14	0,1101	101236,421	5,3438
15	0,1185	101234,6412	5,6227
16	0,1270	101232,4687	5,9455
17	0,1355	101229,8178	6,3170
18	0,1439	101226,5831	6,7427
19	0,1524	101222,6351	7,2284
20	0,1608	101217,817	7,7801
21	0,1693	101211,9410	8,4041
22	0,1778	101204,7868	9,1063
23	0,1862	101196,1028	9,8919
24	0,1947	101185,6126	10,7647
25	0,2032	101173,0287	11,7263
26	0,2116	101158,0779	12,7750
27	0,2201	101140,5398	13,9047
28	0,2286	101120,2991	15,1039
29	0,2370	101097,4106	16,3544
30	0,2455	101072,1656	17,6310
31	0,2540	101045,146	18,9021
32	0,2624	101017,2425	20,1307
33	0,2709	100989,616	21,2774
34	0,2794	100963,5884	22,3038
35	0,2878	100940,4685	23,1774
36	0,2963	100921,3431	23,8760
37	0,3048	100906,8804	24,3910
38	0,3132	100897,1958	24,7298
39	0,3217	100891,8097	24,9163
40	0,3302	100889,6951	24,9891
41	0,3386	100889,3781	25,0000

Nota. La variable de distancia delimita el eje horizontal (x), mientras que los parámetros de presión y velocidad, son los ejes verticales (y) de tipo primario y secundario, respectivamente.

Figura 46

Grafica en función de la presión – velocidad vs longitud



De la Figura 46, se puede mencionar que conforme el fluido avanza desde la región de partida o entrada hacia la región de salida de la tobera de convergencia, pierde presión, pero gana una mayor velocidad, cumpliéndose así el principio del teorema de Continuidad.

6.1.2 Difusor

Tomando en cuenta los datos registrados en conexión a las unidades de medida de velocidad y presión de la Tabla 69 y de la Tabla 76, respectivamente, se estructura lo siguiente:

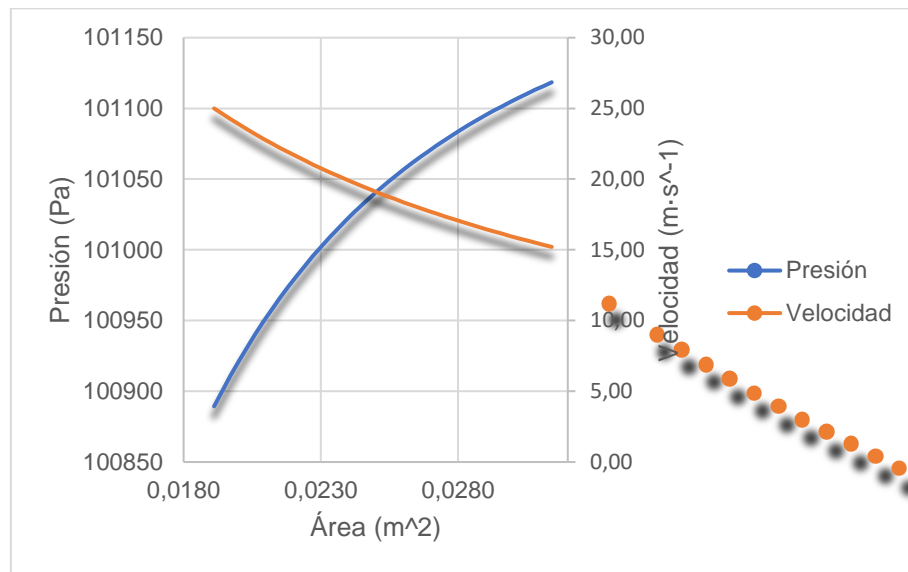
Tabla 111*Datos para la relación de la presión, velocidad y el área en el cono divergente*

No. de fragmentaciones en la sección	Área A_d (m)	Presión P_d (Pa)	Velocidad v_d (m/s)
1	0,0191	100889,3781	25,0000
2	0,0197	100911,1883	24,2387
3	0,0200	100921,3649	23,8752
4	0,0203	100931,0938	23,5224
5	0,0206	100940,4008	23,1800
6	0,0209	100949,3099	22,8473
7	0,0212	100957,8436	22,5240
8	0,0215	100966,0226	22,2098
9	0,0218	100973,8664	21,9042
10	0,0221	100981,3929	21,6069
11	0,0224	100988,6191	21,3176
12	0,0227	100995,5608	21,0359
13	0,0230	101002,2326	20,7616
14	0,0233	101008,6485	20,4943
15	0,0236	101014,8212	20,2338
16	0,0239	101020,7630	19,9799
17	0,0242	101026,4853	19,7322
18	0,0245	101031,9987	19,4907
19	0,0248	101037,3132	19,2549
20	0,0251	101042,4383	19,0248
21	0,0254	101047,3830	18,8001
22	0,0257	101052,1555	18,5807
23	0,0260	101056,7638	18,3664
24	0,0263	101061,2153	18,1569
25	0,0266	101065,5171	17,9521
26	0,0269	101069,6758	17,7520
27	0,0272	101073,6976	17,5562
28	0,0275	101077,5886	17,3647
29	0,0278	101081,3543	17,1773
30	0,0281	101085,0000	16,9940
31	0,0284	101088,5309	16,8145
32	0,0287	101091,9516	16,6387
33	0,0290	101095,2667	16,4666
34	0,0293	101098,4805	16,2981
35	0,0296	101101,5971	16,1329
36	0,0299	101104,6204	15,9711
37	0,0302	101107,5541	15,8124
38	0,0305	101110,4016	15,6569
39	0,0308	101113,1663	15,5044
40	0,0311	101115,8514	15,3549
41	0,0314	101118,4600	15,2082

Nota. Los datos de la columna área, se disponen en el eje de las abscisas, mientras que las variables de presión se estructuran en el eje primario de las ordenadas, y el parámetro de velocidad es organizado mediante el eje secundario de y .

Figura 47

Gráfica fusionada respecto a la presión y velocidad vs el área del difusor



Nota. La gráfica combinada de dispersión simula el comportamiento de las magnitudes de presión y velocidad en función a las áreas fraccionadas a lo largo del difusor.

6.2 Número de Reynolds en las componentes del circuito

Tabla 112

Caracterización de los tipos de flujos presentes en el sistema

Elemento	Región de incidencia	Número de Reynolds Re (adimensional)	Intervalo de posicionamiento del régimen	Categorización del flujo
Cámara de estabilización	Área total	87709,3640	$Re_{sc} > 4000$	Turbulento
Panal acondicionador de flujo	Área total	16034,8544	$Re_{hc} > 4000$	Turbulento
Cámara de convergencia	Área de entrada	87709,3640	$Re_{1c} > 4000$	Turbulento
	Área de salida	214843,1874	$Re_{2c} > 4000$	Turbulento
Cámara para realización de prueba	Área total	214843,1874	$Re_{ts} > 4000$	Turbulento
Cámara de divergencia	Área de entrada	214843,1874	$Re_{1d} > 4000$	Turbulento
	Área de salida	189079,9857	$Re_{2d} > 4000$	Turbulento

Nota. Correspondiente a la presencia de flujos turbulentos, se les atribuirá el término de flujo crítico.

Mediante la observación de la Tabla 112, se puede indicar que, en todas las secciones del túnel de viento, existe un flujo caótico, siendo en la cámara de pruebas en el que el fluido posee un mayor nivel de turbulencia, esto se debe por la velocidad que se obtiene en dicha sección.

6.3 Aplicación del método de análisis paramétrico

6.3.1. Etapa de preprocesamiento del módulo CFD

Preprocesamiento en Ansys Autodyn

Mediante la función Create Named Selection, se crean las caras de frontera o condiciones de contorno del objeto, esta herramienta es activada al dar click derecho sobre la superficie a la que se requiera nombrar. Cabe señalar que previo a todo lo anterior, se debe tomar en cuenta el tipo de selección del puntero, que para este caso se tiene que ajustar al modo Face, la misma que está disponible en la barra de herramientas de la interfaz, y considerar mantenerse sobre la rama Geometry, para efectuar el proceso indicado.

Se establece la etiqueta “Inlet” a la cara delantera de la geometría en general, es decir, se representa a la cámara de sedimentación como una región de entrada.

Se define con el nombre “Outlet” a la parte posterior o de salida del túnel aerodinámico.

Tabla 113

Detalles de la malla

Condiciones predeterminadas	
Preferencia física	CFD
Preferencia del solucionador	CFX
Orden del elemento	Cuadrático
Dimensionamiento	
Tamaño de la función	Proximidad
Centro de relevancia	Fino
Calidad	
Alisado	Alto

Nota. La tabla muestra los ajustes de preprocesado de malla

Proporcionadas las cualidades específicas del mallado, se procede a generar la misma, mediante la pulsación de la función Generate Mesh; es importante aclarar que, siempre y cuando se realice algún tipo de cambio en los parámetros de la malla, resulta esencial accionar la función Update al dar click derecho sobre la rama Mesh, para que la malla se actualice a las modificaciones más recientes.

Tabla 114

Otros detalles de la malla

Estadísticas	
Nodos	78226
Elementos	18414

Nota. La información del parámetro *Estadística*, se mostrará una vez que haya sido generada la malla.

Preprocesamiento en CFX – Pre

Una vez que haya sido activada la celda Setup, automáticamente hacia el lado izquierdo de la interfaz CFX – Pre, se mostrará un menú desplegable que dispondrá de varias funciones, en la cual se sigue la siguiente ruta para poder modificar los dominios predeterminados: Simulation >> Flow Analysis 1 >> Default Domain, esta última función aperturará un cuadro de dialogo, donde se va a establecer manualmente ciertas condiciones principales del entorno que se desee poner en estudio.

Tabla 115

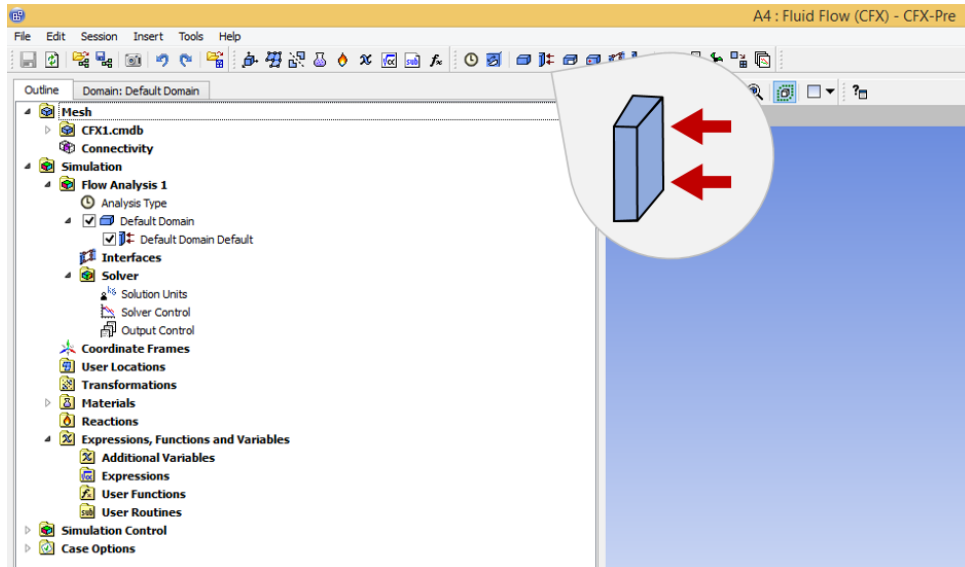
Configuración de los dominios

Menú principal	Categoría del menú	Sección	Parámetro / Función	Valor de la condición	
Domain: Default Domain	Configuraciones básicas	Locación y tipo	Locación	Toda la geometría del cuerpo sólido	
		Definiciones de fluido y partícula	Tipo de dominio	Dominio de fluido	
			–	Fluido 1	
		Fluido 1	Material	Aire a 25 °C	
	Modelos de fluidos	Modelos de dominio	Morfología	Fluido continuo	
			Presión de referencia	101241,98 [Pa]	
			Movimiento del dominio / Opción desplegable	Estacionario	
		Transferencia de calor	Opción desplegable	Energía total	
			Turbulencia	Opción desplegable	Transporte de
					esfuerzo cortante

Dentro de la barra de herramientas (área superior de la interfaz gráfica), se selecciona la opción Boundary, donde se inserta de forma autónoma y manual las fronteras que han sido implantadas anteriormente en el software Ansys Autodyn.

Figura 48

Herramienta para búsqueda de los límites (Boundary)



Nota. Cada vez que intente declarar una frontera preestablecida, deberá volver a activar la opción Boundary.

Después que se registre la denominación de un límite, se mostrará una ventana con diversas opciones que deberán puntualizarse conforme a las necesidades de estudio.

Tabla 116

Configuración de las condiciones de Entrada

Menú principal	Categoría del menú	Sección	Parámetro / Función	Valor de la condición	
Frontera: Entrada	Configuraciones básicas	—	Tipo de frontera	Inlet	
		Régimen del flujo	Locación ^a	Inlet	
	Detalles de frontera	Masa y momento	Opción desplegable	Subsónico	
		Turbulencia	Opción desplegable	Velocidad normal	4,1667 [m s ⁻¹]
			Opción desplegable	Medio (Intensidad = 5%)	
Transferencia de calor	Opción desplegable	Temperatura total	30 [C]		

Nota. ^aSe verifica que solo la cara superficial declarada anteriormente como Inlet, haya sido instaurada en los parámetros del presente cuadro de configuraciones.

En lo relativo a lo anterior, se realiza la especificación del límite Outlet con la función Boundary, para acceder al cuadro de ajustes de dicha frontera.

Tabla 117*Configuración de las condiciones de Salida*

Menú principal	Categoría del menú	Sección	Parámetro / Función	Valor de la condición
Frontera: Salida	Configuraciones básicas	–	Tipo de frontera Locación ^a	Outlet Outlet
	Detalles de frontera	Régimen del flujo Masa y momento	Opción desplegable Opción desplegable Presión relativa	Subsónico Presión estática 101115,41 [Pa]

Nota. ^a Se considera solamente localizar la cara del sólido definida como *Outlet*.

Por consiguiente, se efectúa la respectiva configuración a las paredes del prototipo (se excluye de la selectividad a las fronteras que hayan sido configuradas con anterioridad).

Tabla 118*Configuración del límite Pared*

Menú principal	Categoría del menú	Sección	Parámetro / Función	Valor de la condición
Frontera: Pared	Configuraciones básicas	–	Tipo de frontera Locación	Wall Wall
	Detalles de frontera	Masa y momento Rugosidad de la pared	Opción desplegable Opción desplegable Rugosidad	Pared sin deslizamiento Pared rugosa 3×10^{-7} [m]

Nota. Revisar que hayan sido selectas las paredes externas e internas del circuito.

6.3.2 Etapa de procesamiento en Ansys Fluid Flow (Fluent)

En primer lugar, se selecciona el tipo de modelo mediante el menú desplegable *Models*, en donde se escoge la opción *Energy*, y automáticamente aparecerá un cuadro de diálogo, en la cual se encasilla la función *Energy Equation*.

Para modificar los valores de las propiedades del aire al interior del circuito, se debe abrir ciertas opciones desplegables, debido a esto se sigue la siguiente ruta: *Materials >> Fluid >> Air*.

Tabla 119*Propiedades del material (aire)*

Propiedad	Estado de la magnitud	Valor de la condición
Densidad (kg/m ³)	Constante	1,145
Calor específico C _p (J/kg · K)	Constante	1007
Conductividad térmica (W/m · K)	Constante	0,02625
Viscosidad (kg/m · s)	Constante	$1,895 \times 10^{-5}$

Nota. Los valores de las propiedades del fluido, están delimitados en base a la información existente en las tablas termodinámicas a una temperatura de 30 °C (ver Anexo 8).

Mediante la función Boundary, se proporciona las condiciones de cada uno de los límites que hayan sido instituidos en el sólido (túnel aerodinámico).

Tabla 120

Condiciones a la entrada del modelo

Nombre de la zona	Pestaña de configuración	Parámetro	Valor del parámetro
Inlet	Momento	Método de especificación de la velocidad	Magnitud, Normal a la frontera
		Magnitud de la velocidad (m/s)	4,1667
	Térmico	Presión manométrica inicial (pascal)	0
		Temperatura (K)	303,15

Nota. La presión manométrica es independiente a la presión atmosférica.

Tabla 121

Condiciones a la salida del modelo

Nombre de la zona	Pestaña de configuración	Parámetro	Valor del parámetro
Outlet	Momento	Presión manométrica inicial (pascal)	101118,46
	Térmico	Temperatura (K)	303,15

A continuación, se establece las características de la frontera pared.

Tabla 122

Condiciones de la pared del modelo

Nombre de la zona	Pestaña de configuración	Parámetro	Valor del parámetro
Zona de la célula adyacente: Pared	Momento	Movimiento de la pared	Pared estacionaria
		Condición de corte	No deslizamiento
	Térmico	Condición térmica	Temperatura
		Temperatura (K)	303,15
		Rugosidad de pared (m)	$3e^{-07}$
	Material	Densidad (kg/m^3)	1350
		Calor específico C_p ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$)	1200
		Conductividad térmica ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	0,3

Nota. Las propiedades del material de pared corresponden a las características semejantes del plástico PLA.

Una vez establecida las condiciones pertinentes, al activar la función Run Calculation, se realiza la iteración correspondiente para la visualización de los resultados de la simulación.

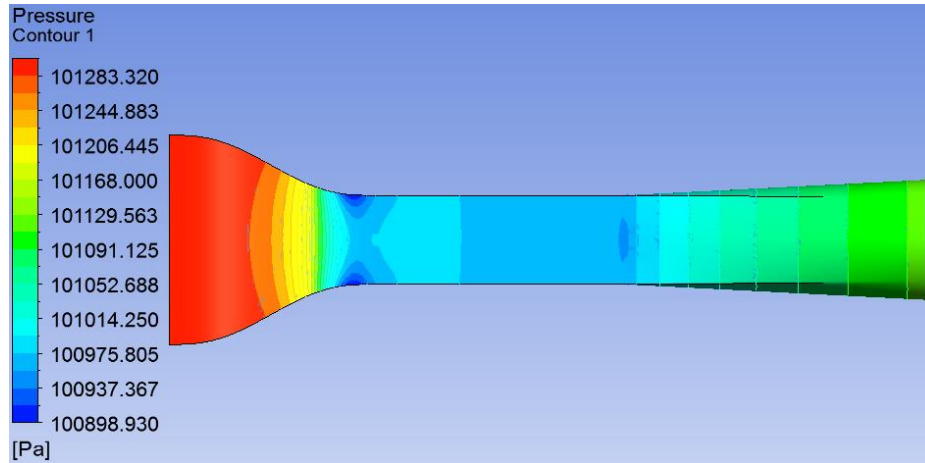
6.3.3 Simulaciones del prototipo aerodinámico

Sin instalación del panel honeycomb

Presión

Figura 49

Distribución de presiones



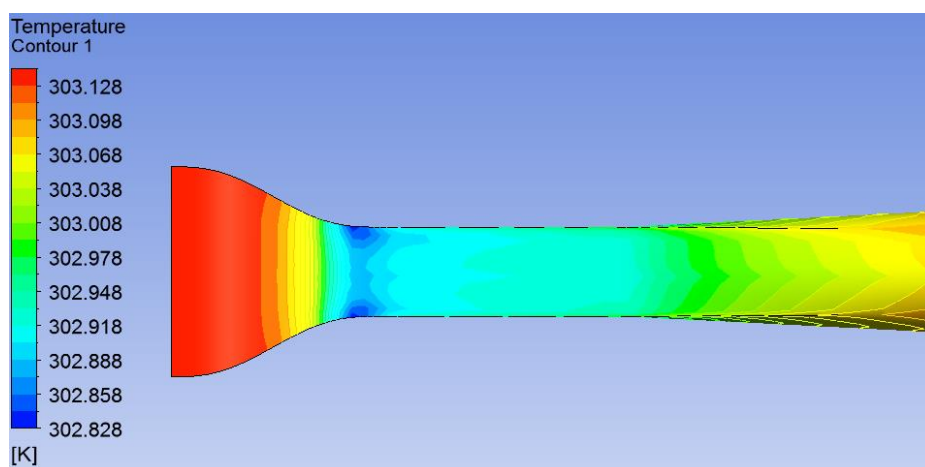
Nota. Por medio de la herramienta Contour, se visualiza el comportamiento de la presión a lo largo de la pared del modelo.

En relación a la Figura 49, se obtiene un valor máximo de presión de aproximadamente 101303 Pa y la cifra de presión mínima equivale a 100899 Pa, por tanto, se puede apreciar que la presión alta es la presión atmosférica que desplaza al interior la primera sección (cámara de estabilización), y mediante la transición en sentido de la corriente, dicha presión baja.

Temperatura

Figura 50

Distribución de la temperatura



Nota. Se muestra el rango de temperatura global en la pared (frontera Wall) del prototipo por medio de la herramienta Contour.

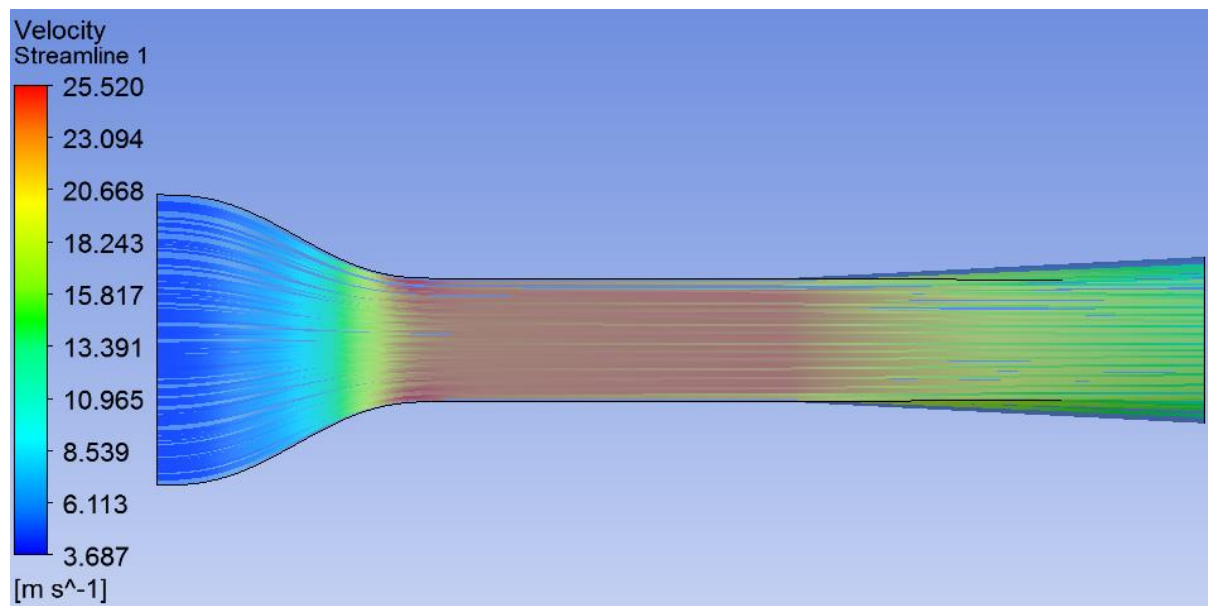
Respecto a la Figura 50, la temperatura mínima es de 303,128 K \approx 29,978 °C, mientras que la temperatura máxima radica en 302,858 K \approx 29,708 °C.

Velocidad

En la siguiente gráfica, se visualiza que el aire de ingreso aumenta significativamente en el cono de convergencia, para de esta manera la velocidad mayor llegue a producirse a la entrada de la cámara de estudio.

Figura 51

Línea de corriente de la velocidad



Nota. La ilustración muestra la dispersión de velocidad desde la frontera Inlet, que ha sido establecido como punto de inicio en la configuración del Streamline.

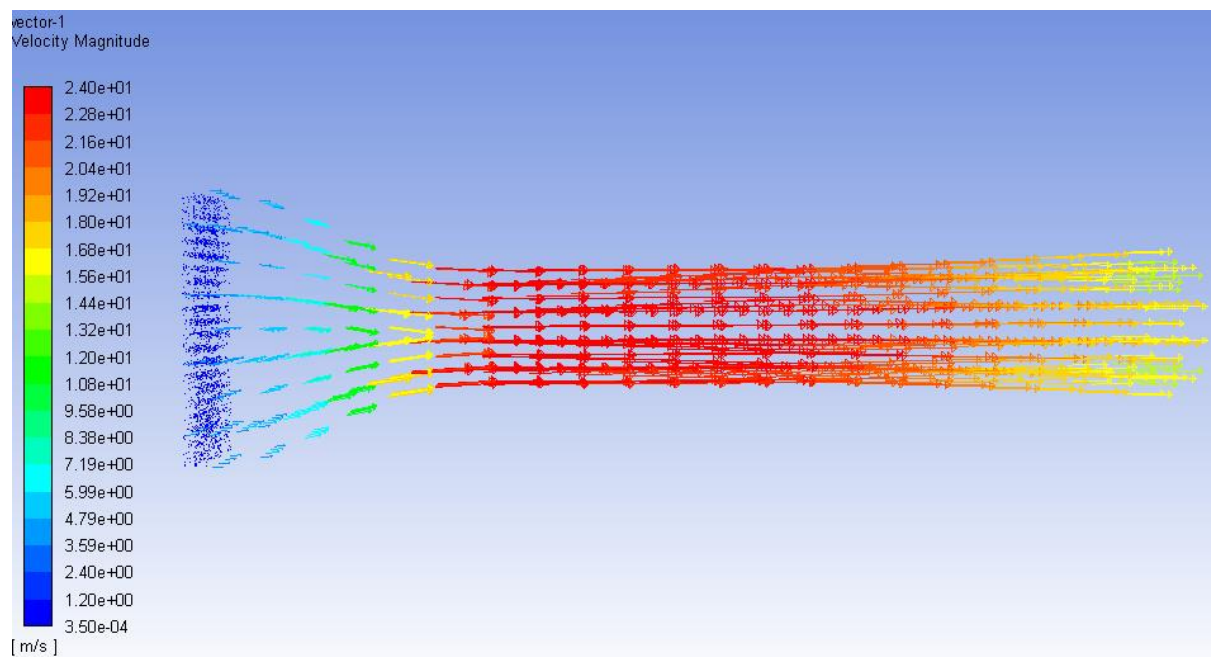
Simulación del prototipo aerodinámico con instauración del panel honeycomb

Velocidad

En comparación con la simulación de velocidad anterior (Figura 51), la velocidad de ingreso (en la cámara de estabilización) es relativamente similar, pero disminuye a 1,20 m/s, sin embargo, tiende a aumentar considerablemente en la contracción, para satisfacer aproximadamente a las condiciones que se requiere en la cámara de ensayos, ya que en este caso se presente una velocidad máxima de 24 m/s.

Figura 52

Velocidad del circuito con la instalación de un panel

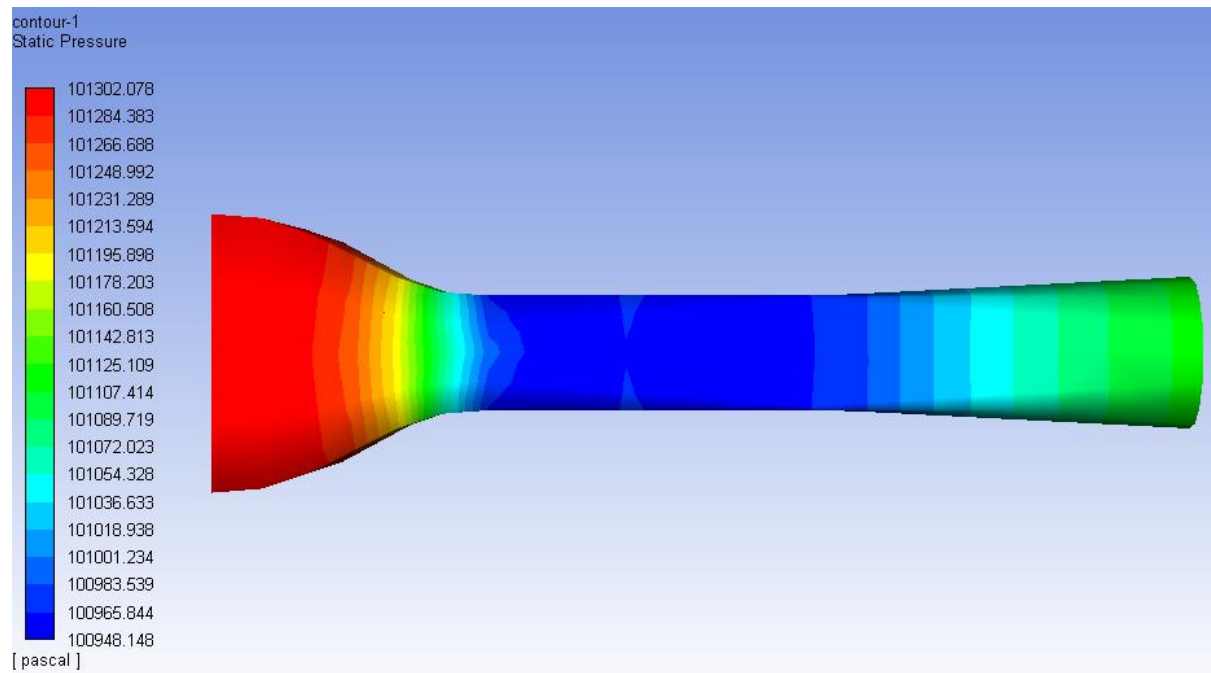


Nota. Para la visualización del resultado gráfico, se ha activada la función *Vector*.

Presión

Figura 53

Presión con la instalación del panel

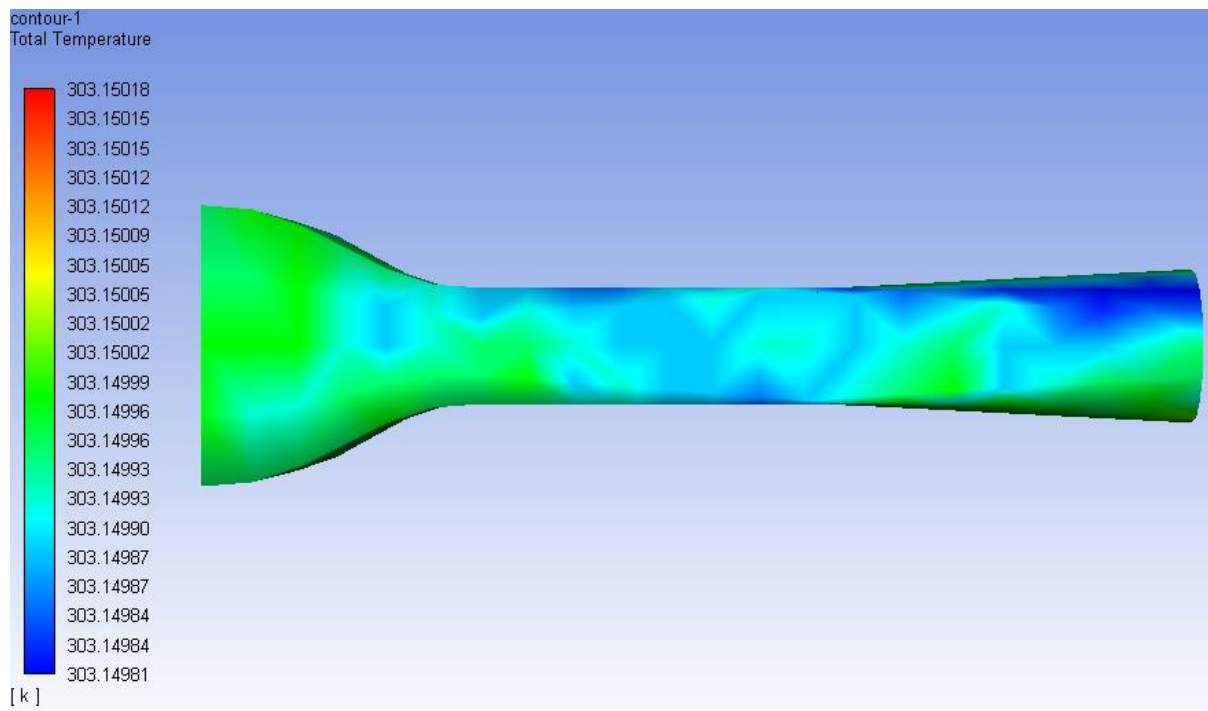


Al tener una baja velocidad a la salida de la cámara de estabilización, la presión a la entrada del cono convergente es mayor, a diferencia de la simulación sin el dispositivo de estabilización de flujo o panel (Figura 49); entre las dos simulaciones efectuadas, existe una diferencia aproximada de 18,758 Pascales.

Temperatura

Figura 54

Temperatura total con la instalación del panel



La temperatura presente una condición sin mayor variación a los parámetros ingresado como referencia antes de ejecutar el solucionador de la simulación; la diferencia no es significativa.

6.4 Diseño de experimentos mediante el software de análisis estadístico Minitab

6.4.1 Diseño factorial

A continuación, se indica el mapa de procesos a implementar para la creación de un diseño experimental, en torno a la forma de llevar a cabo la toma de la prueba de obtención de datos.

Figura 55

Flujograma para la creación de un diseño factorial completo

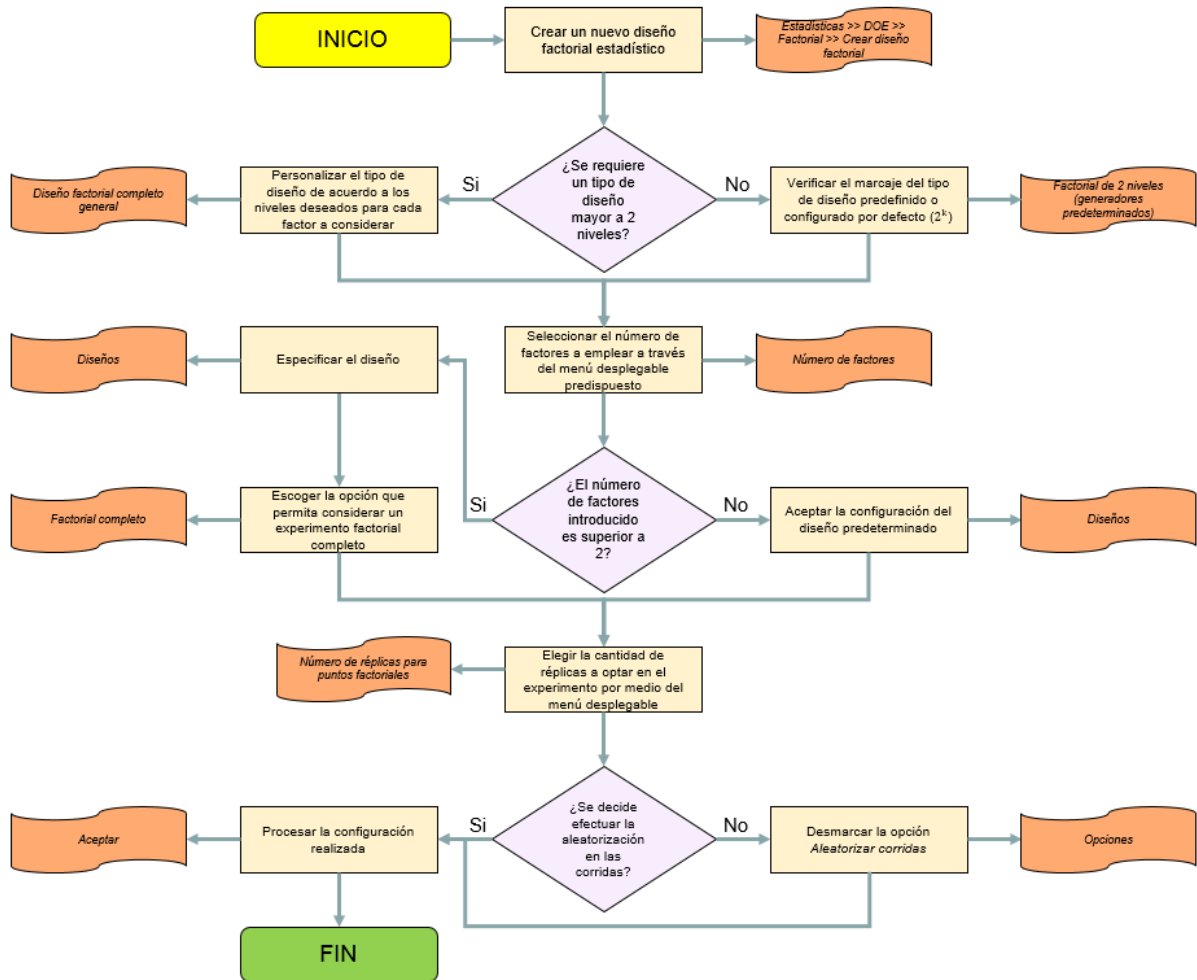


Figura 56

Resultados del diseño factorial

Diseño factorial de múltiples niveles

Resumen del diseño

Factores:	3	Réplicas:	2
Corridas base:	27	Total de corridas:	54
Bloques base:	1	Total de bloques:	1

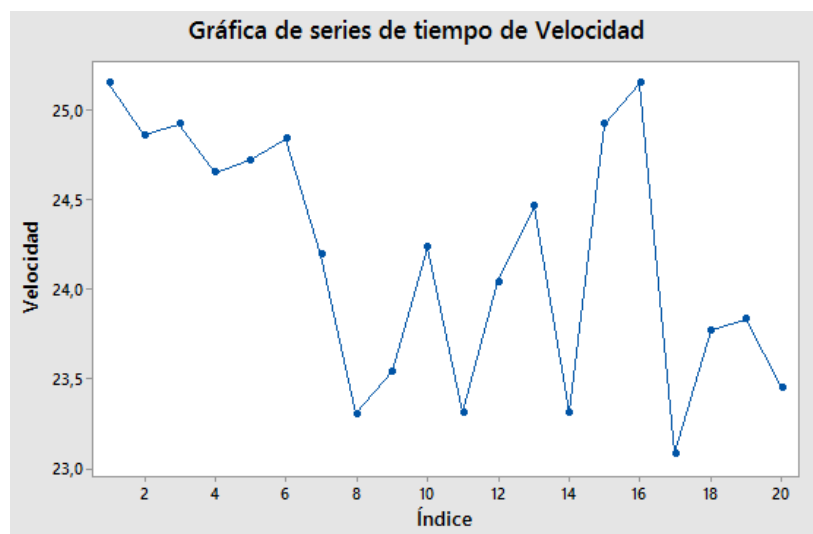
Número de niveles: 3. 3. 3

Figura 57*Tabla del diseño factorial***Tabla de diseño (aleatorizada)**

Corrida	Blq	A	B	C	Corrida	Blq	A	B	C
1	1	1	1	1	28	1	1	2	2
2	1	2	3	3	29	1	3	1	2
3	1	3	1	3	30	1	2	3	2
4	1	2	2	3	31	1	3	2	1
5	1	2	2	1	32	1	2	2	1
6	1	2	2	2	33	1	1	2	3
7	1	2	3	3	34	1	2	1	1
8	1	1	3	3	35	1	3	3	1
9	1	2	3	1	36	1	1	2	1
10	1	1	1	2	37	1	3	3	2
11	1	1	1	1	38	1	2	2	3
12	1	1	3	2	39	1	1	2	1
13	1	1	3	3	40	1	1	1	3
14	1	2	1	2	41	1	3	3	3
15	1	2	1	2	42	1	2	2	2
16	1	3	1	1	43	1	2	1	3
17	1	2	1	1	44	1	1	2	3
18	1	3	3	3	45	1	1	1	2
19	1	3	1	1	46	1	2	3	1
20	1	3	3	1	47	1	2	3	2
21	1	3	3	2	48	1	3	1	3
22	1	1	3	1	49	1	3	2	2
23	1	3	2	3	50	1	2	1	3
24	1	1	1	3	51	1	3	2	3
25	1	1	3	2	52	1	3	2	2
26	1	3	2	1	53	1	3	1	2
27	1	1	3	1	54	1	1	2	2

6.4.2 Análisis de serie de tiempo en relación a los factores de estudio

En el presente apartado se muestran las gráficas de comportamiento de los diferentes factores, captados mediante los dispositivos de lectura (anemómetro y sensores), en donde se ha promediado las muestras obtenidas en función a las réplicas de diseño.

Figura 58*Serie de tiempo de la variable Velocidad*

La gráfica anterior muestra el comportamiento de la velocidad a través del tiempo con una muestra de 20 datos, estos índices se registran dentro de un recinto con condiciones estables, es decir, en el interior de la cámara de ensayos.

Figura 59

Histograma del índice de velocidad

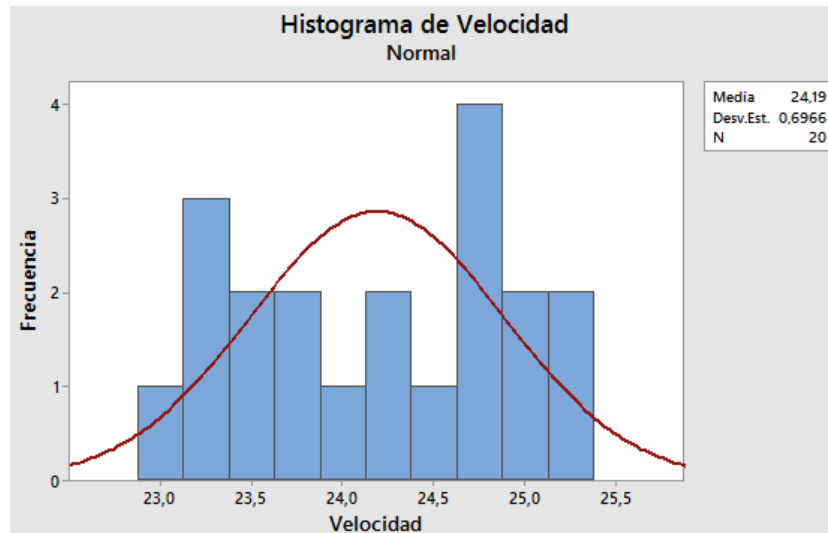
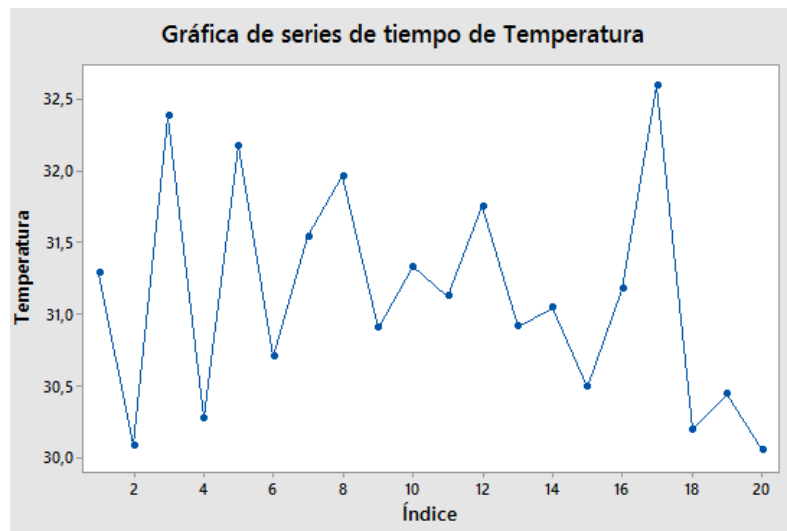


Figura 60

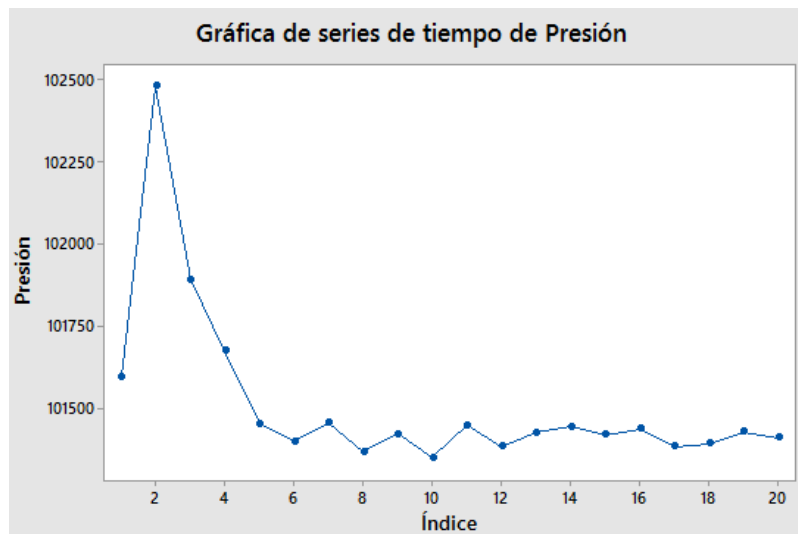
Serie de tiempo respecto a la variable Temperatura



La temperatura puede indicarse que también es cuasi-constante, no se registra mayor variación en la cámara de pruebas.

Figura 61

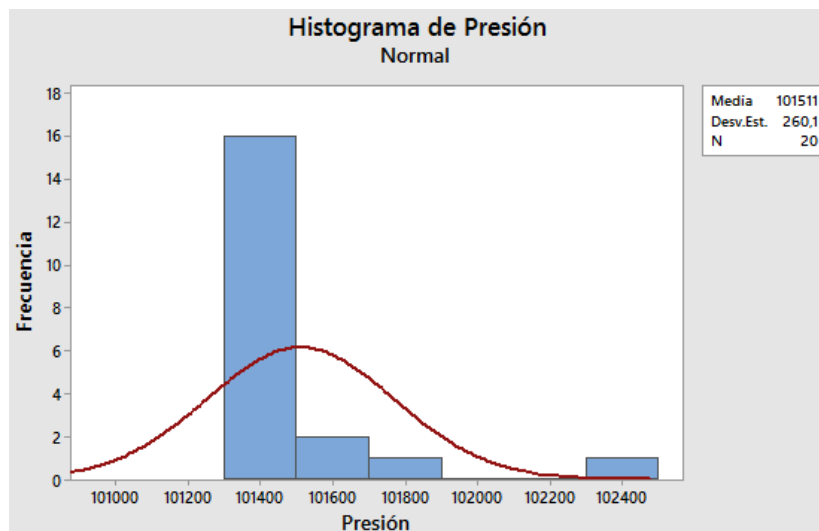
Serie de tiempo en función a la variable Presión



La presión decae alrededor de 100 Pascales desde un punto pico de 102500 Pascales.

Figura 62

Histograma de la presión



En la Figura 62, se nota que la media de presión equivale a 101511 Pascales, en donde se reitera que inicialmente se ha presentado un índice característico, y el valor de presiones se mantiene casi uniforme en la demás toma de muestra.

6.5 Comparativa de las metodologías aplicadas

La comparación, estará enfocada en los datos obtenidos en la sección donde se proyecta el estudio del modelo, es decir, en la sección #3 del prototipo (cámara de prueba).

Tabla 123*Parámetro de velocidad*

	Calculada (m/s)	Simulada (m/s)	Real (m/s)
1	25	22,155508	25,150
2	25	22,75385	24,860
3	25	23,35263	24,920
4	25	24,015	24,650
5	25	24,015	24,720
6	25	24,015	24,840
7	25	24,015	24,190
8	25	24,015	23,300
9	25	24,015	23,540
10	25	24,015	24,230
11	25	24,015	23,310
12	25	25,52	24,040
13	25	25,52	24,460
14	25	25,52	23,310
15	25	25,52	24,920
16	25	25,52	25,150
17	25	25,52	23,080
18	25	25,52	23,770
19	25	25,52	23,830
20	25	25,52	23,450
Promedio	25	23,5030994	24,186

Respecto a la Tabla 123, se ha tomado en consideración registrar un total de 20 muestras distribuidas a lo largo de la cámara de prueba por medio del método de simulación CAE, mientras que, para la medición física, también se ha considerado efectuar 20 tomas.

A continuación, en la Figura 63, se observa la discrepancia que se origina al comparar los métodos de medida, correspondiente al parámetro de velocidad.

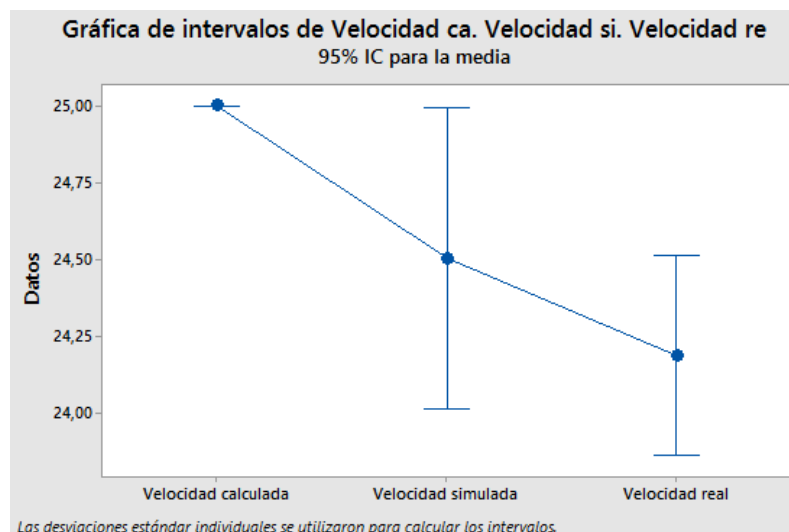
Figura 63*Relación de intervalos de velocidad*

Tabla 124*Diferencias entre métodos para la toma de velocidad*

	Diferencia entre método 1 – 2	Diferencia entre método 1 – 3	Diferencia entre método 2 – 3
(m/s)	1,4984	0,814	0,317
%	2,03%	3,37%	1,31%

En relación a la Tabla 124, se puede registrar que la velocidad que se capta con el dispositivo de muestreo (anemómetro), es muy próxima a la condición de velocidad que se espera obtener al interior de la cámara de pruebas.

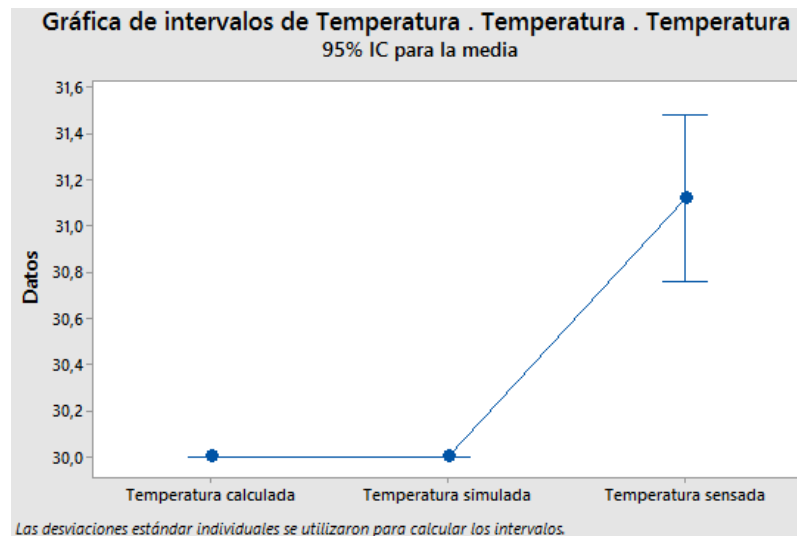
Para la siguiente toma de datos (Tabla 125), se propone seguir el mismo procedimiento realizado para el parámetro de velocidad.

Tabla 125*Parámetro de temperatura*

	Calculada (°C)	Simulada (°C)	Sensada (°C)
1	30	29,99990	31,280
2	30	29,99990	30,080
3	30	29,99993	32,380
4	30	29,99993	30,270
5	30	29,99987	32,170
6	30	29,99993	30,70
7	30	29,99993	31,540
8	30	29,99990	31,960
9	30	29,99990	30,90
10	30	29,99990	31,330
11	30	29,99990	31,120
12	30	29,99990	31,750
13	30	29,99990	30,910
14	30	29,99984	31,040
15	30	29,99984	30,490
16	30	29,99990	31,170
17	30	29,99987	32,590
18	30	29,99987	30,190
19	30	29,99984	30,440
20	30	29,99984	30,050
Promedio	30	29,99988	31,118

Figura 64

Relación entre intervalos de la temperatura



En función de la Figura 64, se determina que, entre los primeros dos métodos, no se generan una diferencia visible, sin embargo, para la temperatura medida en tiempo real, se aprecia una pequeña dispersión respecto a los otros intervalos.

A continuación, se establece las diferencias en grados Celsius y porcentuales respecto a la variable de temperatura en la sección de ensayos.

Tabla 126

Diferencias entre métodos de la variable temperatura

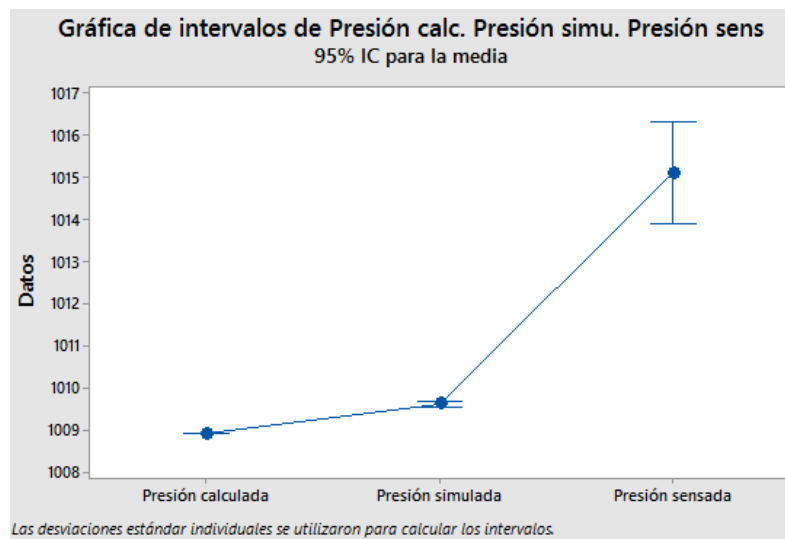
	Diferencia entre método 1 – 2	Diferencia entre método 1 – 3	Diferencia entre método 2 – 3
°C	0,0001105	1,1180	1,1181105
%	0,00%	3,59%	3,59%

De acuerdo con la Tabla 126, se distingue que entre el valor obtenido del método analítico y del método por parametrización CAE, prácticamente no se presentan diferencias, sin embargo, el valor de temperatura captado por el sensor (real) tiene una diferencia equivalente a 1,118 °C, en comparación con los otros dos métodos anteriores.

En la siguiente Tabla 127, se arrojan los datos de la prueba respecto a la variable de presión.

Tabla 127*Parámetro de Presión*

	Calculada (Pa)	Simulada (Pa)	Sensada (Pa)
1	100889,38	100995,3359	101594,540
2	100889,38	100983,5391	102478,490
3	100889,38	100971,7422	101889,880
4	100889,38	100959,9453	101673,380
5	100889,38	100948,1484	101451,520
6	100889,38	100948,1484	101398,020
7	100889,38	100949,1484	101452,960
8	100889,38	100950,1484	101365,860
9	100889,38	100951,1484	101419,460
10	100889,38	100952,1484	101347,600
11	100889,38	100953,1484	101446,260
12	100889,38	100954,1484	101380,600
13	100889,38	100955,1484	101423,580
14	100889,38	100956,1484	101440,900
15	100889,38	100957,1484	101416,780
16	100889,38	100958,1484	101435,540
17	100889,38	100959,1484	101381,940
18	100889,38	100960,1484	101391,320
19	100889,38	100961,1484	101426,160
20	100889,38	100983,5300	101408,740
Promedio	10089,378	100960,3660	101511,177

Figura 65*Relación de los intervalos de presión*

La Figura 65, demuestra la relación en unidades de Hectopascal, que existe entre los tres métodos, viéndose una dispersión en la prueba tomada en el prototipo.

Tabla 128*Diferencias de presión entre los métodos de aplicación*

	Diferencia entre método 1 – 2	Diferencia entre método 1 – 3	Diferencia entre método 2 – 3
Pa	70,9878	621,7984	550,8105
%	0,07%	0,61%	0,54%

En relación a los datos representados en la Tabla 128, se puntualiza que, existe una diferencia levemente significativa entre el método de sensado y los métodos de presión calculada y simulada.

CAPÍTULO VII.

CONCLUSIONES

- En los contenidos investigados del presente documento, los túneles de viento permiten afianzar estudios aerodinámicos sobre modelos a escala, por lo cual se ha propuesto diseñar un prototipo para la verificación del comportamiento de los objetos sometidos a pruebas frente la inducción del flujo de aire, a través de su carrocería, y la propuesta de metodologías de aplicación, considerando las normativas vigentes y la caracterización matemática, basándose en los principios teóricos propuestos por los investigadores de experticia en el área.
- Se desarrolló una caracterización matemática mediante procedimientos analíticos, las cuales han sido comprobadas por medio de la ejecución de un comando efectuado en el software de cálculo numérico, Matlab R2022b, en donde se establecieron las relaciones geométricas que configuran las secciones del prototipo, partiendo del tamaño de la cámara de ensayo respecto al área frontal que proyecta el modelo tomado como base de estudio, para lo cual se ha atribuido el precepto de la relación de bloqueo, la misma que ha sido estimada en una tasa porcentual del 30%, se ha tenido presente que la contracción debe proporcionar las garantías necesaria para la transformación de flujo antes de su ingreso al área de ensayo, por tanto se ha seleccionado un relación de aspecto con valor adimensional de 6, obtenido del cociente entre el área de entrada y salida de dicha cámara, la cual está dentro de los límites sugeridos por los investigadores, Así mismo, se ha percatado sobre las consideraciones de los parámetros ambientales que tienen que suponerse en un túnel de viento de circuito abierto, para que las variables de estudio no generen una variación inapropiada, sino que estas persistan de acuerdo a los principios teóricos.
- A través de las normativas vigentes de regulación, se ha logrado diseñar un banco didáctico a escala 1:20 para modelos vehiculares, de acuerdo con los principios de la mecánica de fluidos, se interpretaron las guías sobre técnicas de modelado y la toma de datos en relación a la corredera de flujo, de esta manera se globaliza el uso correcto como lo exhibe la norma SAE J1592, a través de la normativa ISO 17713-1 y SAE J2884, se incluyó la toma de datos con la aplicación el anemómetro giratorio, considerado como un método de ensayo estandarizado.

- Se analizó los parámetros de velocidad analíticamente en el circuito, a través de regímenes subsónicos en correspondencia al número de mach, la misma que resultó ser inferior a 0,3, respecto a la aplicación de la ecuación de continuidad se corrobora que al principio del túnel de viento se cuenta con una velocidad de $4,16 \text{ m/s}$, y a medida que se transfiere por el cono de convergencia, este valor tiende a aumentar hasta un 83%, puesto a que el valor de salida sobre esta sección, corresponde a 25 m/s , y esta velocidad permanece sin mayor variación durante su transición en la cámara de pruebas, debido a su aspecto simétrico, por consiguiente, para la cámara de divergencia, sucede un proceso inverso, llegándose a presentar una velocidad de salida de 15 m/s , en tanto que la ecuación de Bernoulli permite verificar que la presión baje, conforme disminuye el área de la contracción, favoreciendo el aumento de la velocidad, validando estos principios en el sistema.
- Mediante el análisis comparativo de los resultados, se ha logrado interpretar que el parámetro de velocidad medido en el prototipo tiene una variación mínima con respecto a la velocidad esperada, ya que a través del dispositivo de muestreo se obtuvo una velocidad promedio de $24,18 \text{ m/s}$, cuando la velocidad que ha sido propuesta, es de 25 m/s , presentándose al valor, una discrepancia porcentual del 4,37%, para la variable de temperatura se tiene una diferencia aproximado al 4%, por lo que la variación de la temperatura entre lo sensado y lo simulado, es de $1,18 \text{ °C}$. Mientras que, para el parámetro de la presión, se posee una contrariedad de alrededor de 600 Pascales, comparándolo con lo simulado y el valor obtenido mediante la instrumentación en la prueba real, resultando tener valores no tan significativos.

RECOMENDACIONES

- La instrumentación y manufactura de valores atenuados, puede considerarse en un futuro valerse de elementos con una mayor captación de datos, por medio del sistema IoT (Internet de las cosas), a través de tecnologías de interconexión Wi-Fi, de esta manera se llega a evitar el uso del cableado en el cubículo de pruebas del modelo didáctico.
- Se considera para futuras pruebas metodológicas, reforzar la instrumentación instalada en el túnel, que permitan captar información disminuyendo el periodo de tiempo de recepción, ya que los dispositivos presentados para esta investigación, ofrece una lectura cada 2 segundos, siendo esta su configuración más baja de interpretación confeccionada en el código (delay 2000).
- Se recomienda a futuros investigadores verificar que las veletas del anemómetro deben estar en posición estacionaria antes de comenzar cada prueba, y esperar 10 segundos para la recepción de datos, luego de haber iniciado el envío del flujo en el túnel viento, tal como lo especifica la normativa ISO 17713-1, con la finalidad de evitar que la hélice del instrumento otorgue datos erróneos al principio de la adquisición de valores.
- Al conectar el circuito eléctrico del banco, tendrá que verificarse que el computador haya identificado la conexión por puerto COM, de esta manera al ejecutar el aplicativo, no presentará inconvenientes en visualizar los datos, en caso de persistir dificultades en el reconocimiento del puerto, es preferible cambiar el cable USB tipo B destinado al envío de información.
- El aplicativo creado para el banco del túnel, fue gestionado en un lenguaje de programación por Visual Basic, por tanto, es de carácter obligatorio que el ordenador disponga del complemento .NET Framework con versión 4.5 y actuales.
- Se sugiere implementar el uso de normativas para fundamentar el desarrollo investigativo en la proyección del conjunto (túnel de viento) y la toma de datos, la cual deberán garantizar seguridad y fiabilidad en la adquisición de valores, conociendo el número de muestras requeridos y posicionamiento del instrumento de medición. De esta forma, las normas de regulación internacional permiten dar objetividad y cumplimiento del proyecto, además de conocer las técnicas, requerimientos y factores que implican en el estudio aerodinámico en modelos vehiculares.

- Para la simulación paramétrica CAE con elementos internos al prototipo aerodinámico (como panales u otros objetos), será importante que se considere implementar la herramienta Mesh Control, para proporcionar un mallado personalizado con mejores condiciones tanto al número de nodos y al número de elementos, para de esta manera obtener precisión en los resultados sobre el modelo.

REFERENCIAS

- ALCOMAX. (s.f.). *ALCOMAX*. ALCOMAX: <https://alcomaxecuador.com/>
- Aparicio Izquierdo, F., Vera Alvarez, C., & Díaz López, V. (2001, Noviembre). *Teoría de los vehículos automóviles* (Segunda ed.). (Universidad Politécnica de Madrid, Ed.) Madrid, España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. https://books.google.com.ec/books/about/Teor%C3%ADa_de_los_veh%C3%ADculos_autom%C3%B3viles.html?id=algpAAAACAAJ&redir_esc=y
- Arduino. (11 de 04 de 2022). *Arduino*. Arduino: <https://www.arduino.cc/en/hardware>
- Arduino. (n.d.). *Arduino*. Retrieved 02 22, 2023, from Arduino: <https://www.arduino.cc/>
- Arifuzzaman, M., & Mashud, M. (2012, October). Design Construction and Performance Test of a Low Cost. *IOSR Journal of Engineering*, 2(10), 83 - 92. [http://iosrjen.org/Papers/vol2_issue10%20\(part-5\)/N021058392.pdf](http://iosrjen.org/Papers/vol2_issue10%20(part-5)/N021058392.pdf)
- Barbero Corral, E., Doménech Tomasa, M., Jiménez Igea, R., Navarro Canut, J., Ruiz Gil, C., Sacau Fontela, J. L., & Simón Santamaría, J. (2012, Agosto 23). *Matemáticas 1º ESO*. (M. d. Profesional, Ed.) Madrid, España: CIDEAD. https://www.matematicasonline.es/cidead/libros/1eso/Libro_Matematicas_1ESO.pdf
- Barlow, J. B., Rae, W. H., & Pope, A. (1999). *Low-Speed Wind Tunnel Testing* (Third ed.). New York: Wiley-Interscience. https://web.pdx.edu/~d4eb/chrome/J._B._Barlow,_W._H._Rae,_Jr.,_A._Pope_Low_Speed_Wind_Tunnel_Testing.pdf
- Bell, J. H., & Mehta, R. D. (1988, August 1). *Contraction Design for Small Low-Speed Wind Tunnels*. Stanford University, Department of aeronautic and acoustics. Stanford: NASA Technical Reports Server. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19890004382>
- Berberan Santos, M. N., Bodunov, E. N., & Pogliani, L. (1997, May). On the barometric formula. *American Journal of Physics*, 65(5), 404 - 412. <https://doi.org/https://doi.org/10.1119/1.18555>
- Bordignon, F. R., Hahn, Á., & Iglesias, A. A. (2018). *Diseño e impresión de objetos 3D: una guía de apoyo a escuelas* (Primera ed.). Buenos Aires: UNIPE: Editorial Universitaria. <https://editorial.unipe.edu.ar/colecciones/herramientas/diseño-e-impresión-de-objetos-3d-una-guía-de-apoyo-a-escuelas-detail>
- Bosch GmbH, R. (2022, April 26). *Automotive Handbook* (Eleventh ed.). Hoboken, New Jersey, United States: John Wiley & Sons Ltd. <https://www.bookdepository.com/es/Automotive-Handbook-11th-Edition-R-Bosch-GmbH/9781119911906>
- Cardona Serrano, M. (21 de 10 de 2018). *Dibujo Técnico: Escalas*. (U. d. Alicante, Ed.) Alicante: Universidad de Alicante. Universidad de Alicante: <https://web.ua.es/es/cursos-cero/documentos/dibujo-ingenierias/escalas.pdf>

- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y aplicaciones* (Primera ed.). (V. Campos Holguín, Trans.) Madrid, Madrid, España: McGraw-Hill Interamericana de España S.L. <https://studylib.es/doc/8855056/mecanica-de-fluidos-fundamentos-y-aplicaciones---yunus-ce...>
- Cogotti, A. (2008, June 1). Evolution of performance of an automotive wind tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(6 - 7), 667 - 700. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.06.007>
- Colera, J., Gaztelu, I., Oliveira, M. J., & Colera Cañas, L. (2011). *Matemáticas 3º ESO*. (C. de la Prida, Ed.) Madrid, España: Grupo Anaya. <https://mate3isabel.files.wordpress.com/2016/05/libro-adaptacion-curricular.pdf>
- Daly, B. (1992). *Woods Practical Guide to Fan Engineering* (Sixth ed.). (Fläkt Woods Limited, Ed.) Colchester, Essex, Inglaterra: Woods of Colchester Limited. <https://studylib.net/doc/8888297/flakt-woods-practical-guide-to-fan-engineering>
- Drinkrow, R. (1972). A Solution to the Paired Gill-Anemometer Response Function. *Journal of Applied Meteorology*, 76-80. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1972\)011<0076:ASTTPG>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0450(1972)011<0076:ASTTPG>2.0.CO;2)
- Editorial Don Bosco. (2016). *Ingenios Matemática 1 BGU*. (Grupo edebé, Ed.) Cuenca, Azuay, Ecuador: Editorial Don Bosco. <https://educacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/04/curriculo/1BGU-Matematicas.pdf>
- Electronics, A. (2022). *AV Electronics*. AV Electronics: <https://avelectronics.cc/producto/modulo-hx711-para-sensor-de-peso/>
- Electrostore, G. (s.f.). *Electrostore*. Electrostore: <https://gruoelectrostore.com/shop/sensores/>
- FAKESPOT. (s.f.). *FAKESPOT*. Retrieved 2023 de 02 de 10, from FAKESPOT: <https://www.fakespot.com/company/aoputtriver>
- Fitzgerald, S., & Shiloh, M. (2012). *Arduino Projects Book*. Torino: Arduino. <https://candy-ho.com/Drivers/librodeproyectosdearduinostarterkit-151212174250.pdf>
- Foken, T. (2017). *Micrometeorology* (Segunda ed.). Belin: Springer. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-25440-6>
- Foken, T., Kaiser, H., & Wolfgang, R. (1983). Propelleranemometer: Überblick und spezielle Entwicklungen am Meteorologischen Hauptobservatorium Potsdam. *Akademie-Verlag*, 48.
- Frederiksen Scientific. (2017, August 8). *Speed of sound in air*. Ølgod: Frederiksen Scientific A/S. <https://no.frederiksen.eu/Admin/Public/Download.aspx?file=Files%2FFiles%2Fexp%2F131000%2F131410-EN-Speed-of-sound-in-air.pdf>
- Gatley, D. P., Hermann, S., & Kretzschmar, H. J. (2008, September). A Twenty-First Century Molar Mass for Dry Air. *HVAC&R Research*, 14(5), 655 - 662. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/10789669.2008.10391032>

- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping*, (Segunda ed.). New York: Springer. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- Hucho, W. H. (1987, January 1). *Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering* (First ed.). London, Greater London, England: Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-1267-8.50015-4>
- INEN. (1 de 11 de 2022). *Instituto Ecuatoriano de Normalización*. Instituto Ecuatoriano de Normalización: https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/NTE_INEN_ISO_5455.pdf
- International Organization for Standardization. (2022). *ISO - International Organization for Standardization*. ISO - International Organization for Standardization: <https://www.iso.org/standard/>
- ISO. (2007). *ISO 17713-1:2007 Meteorology - Wind measurements - Part 1: Wind tunnel test methods for rotating anemometer performance*. Vernier, Geneve, Switzerland: International Organization for Standardization.
- ISO. (2007). *Meteorology - Wind measurements - Part 1: Wind tunnel test methods for rotating*. Berlin: Beuth-Verlag.
- Jacob, D. J., & Mickley, L. J. (1999). Introduction to Atmospheric Chemistry. In D. J. Jacob, & L. J. Mickley, *Chapter 2. Atmospheric Pressure* (pp. 12 - 20). Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos: Princeton University Press. https://projects.iq.harvard.edu/files/acmg/files/intro_atmo_chem_bookchap2.pdf
- Kadry, S. (2013, Octubre 31). Mathematical Formulas for Industrial and Mechanical Engineering. In S. Kadry, *Symbols and Special Numbers* (First ed., pp. 1 - 16). Ámsterdam, Países Bajos: Elsevier Insights. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420131-6.00001-4>
- Katz, J., & Plotkin, A. (5 de February de 2001). *Low-Speed Aerodynamics* (Second ed., Vol. 13). New York, United States: Cambridge University Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/CBO9780511810329>
- Kristensen, L. (1998). *Cup Anemometer Behavior in Turbulent Environments*. Roskilde: Risø National Laboratory.
- Lluch Hernández, R. (1967). *Motores diésel marinos* (Primera ed.). Barcelona: CEAC.
- Lock, C. (1929, October). *The Interference of a Wind Tunnel on a Symmetrical Body*. Cranfield University. Cranfield: Her Majesty's Stationery Office address. <https://reports.aerade.cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826.2/4107/arc-rm-1275.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Martínez de la Calle, J. (2009, Enero 24). *Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón*. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón: <https://www.kimerius.com/app/download/5780666637/Flujo+compresible.pdf>

- Mauro, S., Brusca, S., Lanzafame, R., Famoso, F., Galvagno, A., & Messina, M. (2017, December 21). Small-Scale Open-Circuit Wind Tunnel: Design Criteria, Construction and Calibration. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(23), 13649 - 13662. http://ripublication.com/ijaer17/ijaerv12n23_83.pdf
- Mehta, R. D., & Bradshaw, P. (1979, November). Design Rules for Small Low Speed Wind Tunnels. (Royal Aeronautical Society, Ed.) *Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society*, 83, 443 - 453. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/S0001924000031985>
- Meseguer Ruiz, J., & Sanz Andrés, Á. (2010). *Aerodinámica Básica* (Segunda ed.). Madrid, España: Garceta Grupo Editorial. Retrieved Libro, from <https://www.iberlibro.com/servlet/BookDetailsPL?bi=30962227475>
- Meteored. (s.f.). https://www.meteored.com.ec/tiempo-en_Guayaquil-America+Sur-Ecuador-Guayas--1-19995.html
- Moreno Muñoz, A., & Córcoles Córcoles, S. (2017). *Aprende Arduino en un fin de semana*. Michigan: Independently published. <https://www.bolanosdj.com.ar/MOVIL/ARDUINO2/Arduinounfinseman.pdf>
- Mott, R. L. (1996). *Mecánica de fluidos aplicada* (Cuarta ed.). (S. Helba, Ed., & C. R. Cordero Pedraza, Trans.) Naucalpan de Juárez, Estado de México, México: Prentice Hall Hispanoamericana. <https://deymerg.files.wordpress.com/2013/07/mecanica-fluidos-mott.pdf>
- Mott, R. L., & Untener, J. A. (2015). *Mecánica de Fluidos* (Séptima ed.). (S. Fonseca, Ed., & J. E. Murrieta Murrieta, Trans.) Ciudad de México, México: Pearson Educación.
- Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. (1999). *Fundamentos de Mecánica de Fluidos* (Primera ed.). (Grupo Noriega Editores, Ed., & H. Villagomez Velásquez, Trans.) Ciudad de México, México: Editorial Limusa.
- Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. (2002). *Fundamentals of Fluid Mechanics* (Fourth ed.). (W. Anderson, Ed.) New York, United States of America: John Wiley & Sons, Inc. <https://www.amazon.com/Fundamentals-Mechanics-Okiishi-Theodore-Hardcover/dp/B010WEZEKY>
- Nader, M. K., Hady, A. A., & Attalla, M. M. (2020). Design and Construction Low Speed Wind Tunnel. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 228 - 231. <http://jsaer.com/download/vol-7-iss-7-2020/JSAER2020-7-7-228-231.pdf>
- Neriya Hegade, K. P., Natalia, R., Wehba, B., Mittal, A., Bhat, R. B., & Packirisamy, M. (2020, April 8). Design and study of mini wind tunnel for microsystems fluid. *Springer Nature*(850), 14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42452-020-2602-x>
- Obeid, S., Jha, R., & Ahmadi, G. (2017, January 5). RANS Simulations of Aerodynamic Performance of NACA 0015 Flapped Airfoil. *MDPI*, 2(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/fluids2010002>

- Obidi, T. Y. (2014, March 20). *Theory and Applications of Aerodynamics for Ground Vehicles* (1 ed.). Warrendale, Pennsylvania, United States: SAE International. <https://doi.org/10.4271/R-392>
- Park, H. (2015). *The International Vehicle Aerodynamics Conference*. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03634-9>
- Peña Pérez, L. M., & Becerra Santiago, L. O. (2010, Octubre 27). Impacto de la nueva fórmula de la densidad del aire CIPM-2007. *Simposio de Metrología*, 5. <https://www.cenam.mx/sm2010/info/pmiercoles/sm2010-mp03a.pdf>
- Pereira, J. D. (2011). *Wind Tunnels : Aerodynamics, Models and Experiments* (First ed.). New York: Nova Science Publishers, Incorporated. <https://bibliotecas.ups.edu.ec:2708/lib/upsal/reader.action?docID=3017822&query=wind+tunnel+design>
- Prandtl, L. (1933, October 1). *Attaining a steady air stream in wind tunnels*. California Institute of Technology. Washington: National Advisory Committee for Aeronautics. NASA Technical Reports Server: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930094691>
- PROTOLABS. (2021). *HUBS*. HUBS: <https://www.hubs.com/get/am-technologies/>
- Průša, J. (10 de 17 de 2022). *Prusa 3D*. Prusa 3D: <https://www.prusa3d.com/es/>
- Rodríguez García, J. I., & Villar Paúl, J. (2017, Mayo 4). *Sistemas de Transmisión y Frenado*. Madrid, España: Macmillan. https://www.macmillaneducation.es/wp-content/uploads/2018/09/sistemas_transmision_libroalumno_unidad1muestra.pdf
- SAE Internacional. (2022). *SAE Internacional*. SAE Internacional: <https://www.sae.org/standards/>
- SAE International. (1994). *SAE J2071: Aerodynamic testing of road vehicles - open throat wind tunnel adjustment*. Pennsylvania, Estados Unidos: SAE International.
- SAE International. (2010). *SAE J594: Vehicle Aerodynamics Terminology*. Pennsylvania: SAE International.
- SAE International. (2016). *SAE J2084: Aerodynamic testing of road vehicles -testing methods and procedures*. Pennsylvania: SAE International.
- SAE International. (10 de 2019). *SAE International*. (S. International, Editor) https://doi.org/10.4271/J2881_201910
- SAE International. (2019). *SAE J2881: Measurement of Aerodynamic Performance for Mass-Produced Cars and Light-Duty Trucks*. Pennsylvania: SAE International.
- Santos, A. M., Souza, D. B., Costa, F. O., Farias, M. H., Massari, P. d., Araújo, S., & Zanirath, B. (2016). Effects of screens set characteristics on the flow. *Journal of Physics: Conference Series*, 733, 9.
- Schulz-Hausmann, V., & Vagt, J.-D. (1987). Influence of Test Section Length and Collector Area on Measurements in Three-Fourths Open Jet in Automotive Industry. *SATA-Conference*.
- Stathopoulos, T. (2015). *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. ScienceDirect.

- Technology, T. 3. (s.f.). *Tenlog 3D Solutions*. Retrieved 22 de 02 de 2023, from Tenlog 3D Solutions:
<https://www.tenlog3d.com/>
- The MathWorks Inc. (s.f.). *MATLAB Documentation*. <https://www.mathworks.com/help/matlab/>
- TheExpressWire. (2022, September 29). Engineering Software (CAD, CAM, CAE, AEC, & EDA) Market 2022 Size and Dynamic Analysis by Company Recent Development, Strategies, Competitive Landscape and Demand Forecast till 2026. *Digital Journal Inc*, 1-2.
- Ultimaker. (s.f.). *Ultimaker*. (U. BV, Editor) Retrieved 10 de 03 de 2023, from Ultimaker:
<https://ultimaker.com/>
- White, F. M. (2003). *Mecánica de Fluidos* (Quinta ed.). (S. Figueras, Ed., M. Vera Coello, M. Hermanns Navarro, R. Gómez Blanco, & Ó. Flores Arias, Trans.) Madrid, España: McGraw-Hill/Interamericana.
https://www.academia.edu/35477659/Mecanica_de_los_Fluidos_White_5ta_Edici%C3%B3n
- White, F. M. (2003). *Mecánica de Fluidos* (Quinta ed.). (S. Figueras, Ed., M. Vera Coello, M. Hermanns Navarro, R. Gómez Blanco, & Ó. Flores Arias, Trads.) Madrid, España: McGraw-Hill/Interamericana .

ANEXOS

Anexo 1

Información sobre el suministro de carga

Figura 66

Suministro de carga para el ensayo aerodinámico

Configuración del vehículo		Especificaciones de carga del vehículo						Símbolos
No. de asientos	No. de filas	1. Fila		2. Fila		3. Fila		Disposición de asientos
		No. de asientos	Carga	No. de asientos	Carga	No. de asientos	Carga	● Cargado con 70 kg ○ No cargado
2 y 3	1	1	2 x 70 kg	—	—	—	—	
	2	1	1 x 70 kg	1	0 kg	—	—	
4 y 5	2	2	2 x 70 kg	2 y 3	1 x 70 kg	—	—	
6 y 7	2	3	2 x 70 kg	3	2 x 70 kg	—	—	
	3	2	2 x 70 kg	2 y 3	2 x 70 kg	2	0 kg	
	3	2	2 x 70 kg	2 y 3	2 x 70 kg	2 y 3	0 kg	
8 y 9	3	3	2 x 70 kg	3	0 kg	3	3 x 70 kg	
	3	3	2 x 70 kg	3	1 x 70 kg	2	2 x 70 kg	

Nota. Tomado de: (SAE International, 2019, p. 12)

Anexo 2

Tablas de registro de datos según normativa

Figura 67

Registro de información del vehículo de estudio

Hoja de información sobre el vehículo - SAE J2881					
Información general					
Compañía				Fecha de prueba	
Vehículo				Lugar de prueba	
Tipo				Año del modelo	
Ruedas del vehículo (Aro/llantas)			Dimensión del vehículo		
Frontales		Ancho de eje frontal		Longitud	
Traseros		Ancho de eje posterior		Anchura	
Marca y modelo del neumático		Batalla		Altura	
Elementos			Ficha básica del vehículo		
Alerón frontal (Chin spoiler)		Faldón lateral izquierdo (Skirt L)		Motor	
Alerón trasero (Rear spoiler)		Faldón lateral derecho (Skirt R)		Transmisión	
Portaequipaje de techo (Roof rack)		Difusor (Diffuser)		Dirección	
Disposición nominal			Contornos de paso de rueda		
Fotografía			(A) LF =		
			(A) RF =		
			(B) LR =		
			(B) RR =		
			(Opcional) C =		
Resumen de condición de prueba			Peso inducido		
Túnel de viento		Control de capa límite		Frontal	
Área de la boquilla		Movimiento del suelo		Centro	
Velocidad del aire		Restricción (bloqueo de ruedas)		Posterior	
Datos aerodinámicos			Fotografía referencial del vehículo		
$C_D =$	m ²				
$A =$					
$C_D \times A =$					
$C_{LF} =$					
$C_{LR} =$					
Fotografía de la rueda (opcional)	Fotografía debajo del vehículo		Fotografía frontal del vehículo		

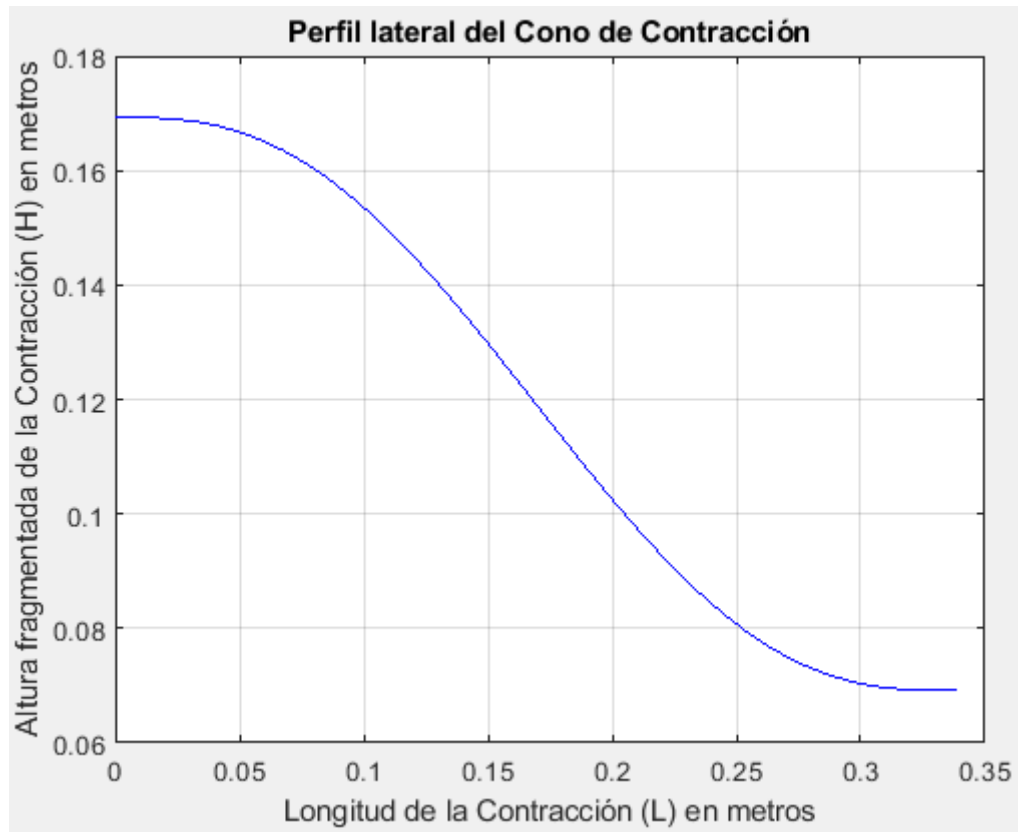
Nota. Los cuadros en vacío, corresponde a la fracción de llenado que deber ser completado por el grupo investigador. Tomado de: (SAE International, 2019, p. 11)

Figura 68

Registro de información del túnel de viento

Hoja de información sobre el túnel de viento - SAE J2881			
Información general			
Compañía		Fecha de prueba	
Túnel		Lugar de prueba	
Tipo de circuito		Año de inicio de operaciones	
Información de sección de prueba		Dimensionamiento de boquilla de entrada	
Tipo de sección de prueba		Longitud	
Longitud de sección		Anchura	
Base giratoria (Turntable)	<i>No disponible</i>	Área	
Dimensionamiento de sección de prueba		Dimensionamiento del difusor	
Longitud		Longitud	
Anchura		Área (entrada)	
Área		Radio (salida)	
Movimiento del suelo		Soporte / balance del vehículo	
Tipo de cinta móvil	<i>No disponible</i>	Tipo de soporte	
Localización de la cinta móvil		Longitud	
Otras características		Anchura	
Presiones		Restricción / Bloqueo de ruedas	
Presión dinámica		Tipo de restricción	
Presión estática		No. de ruedas	
Otros		No. de bloqueos	
Curva de capa límite		Curva de distribuciones de presiones	
Fotografía frontal del vehículo		Fotografía posterior del vehículo	

Nota. Los cuadros en vacío, corresponde a la fracción de llenado que deber ser completado por el grupo investigador. Tomado de: (SAE International, 2019, p. 14)

Anexo 3*Codificación para el dimensionamiento de las secciones***Figura 69***Curva característica de la contracción vista en perspectiva lateral izquierda***Figura 70***Intersección de radios en la tobera de entrada*

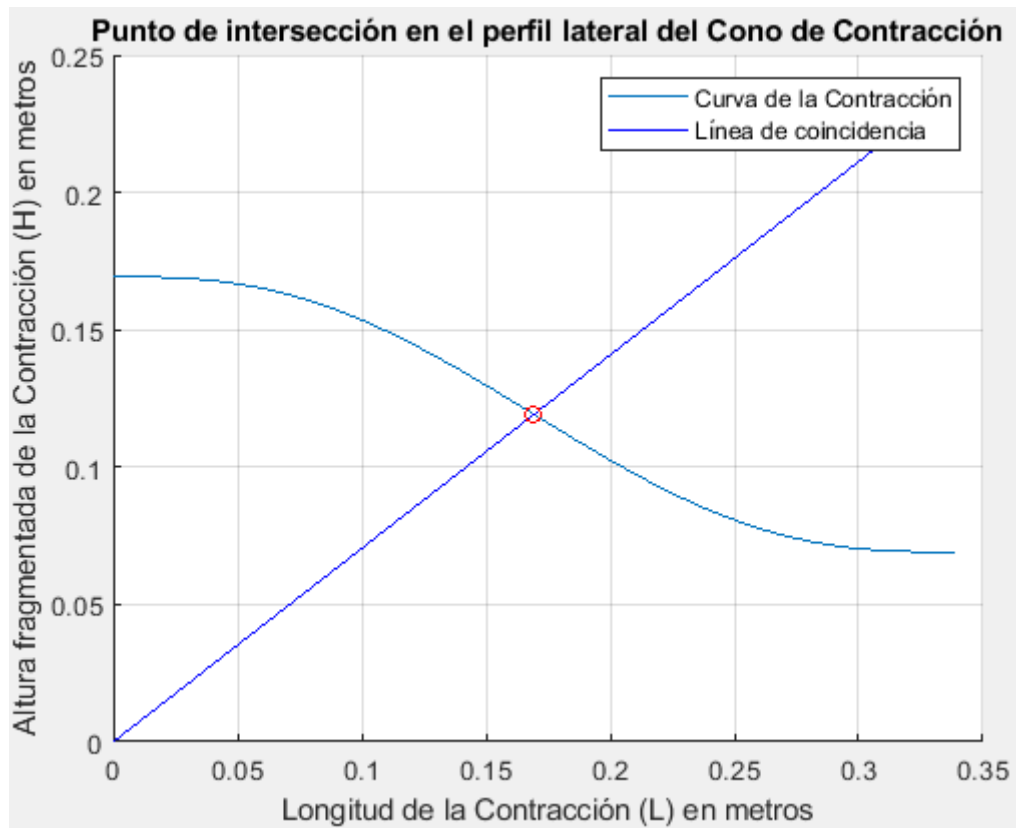
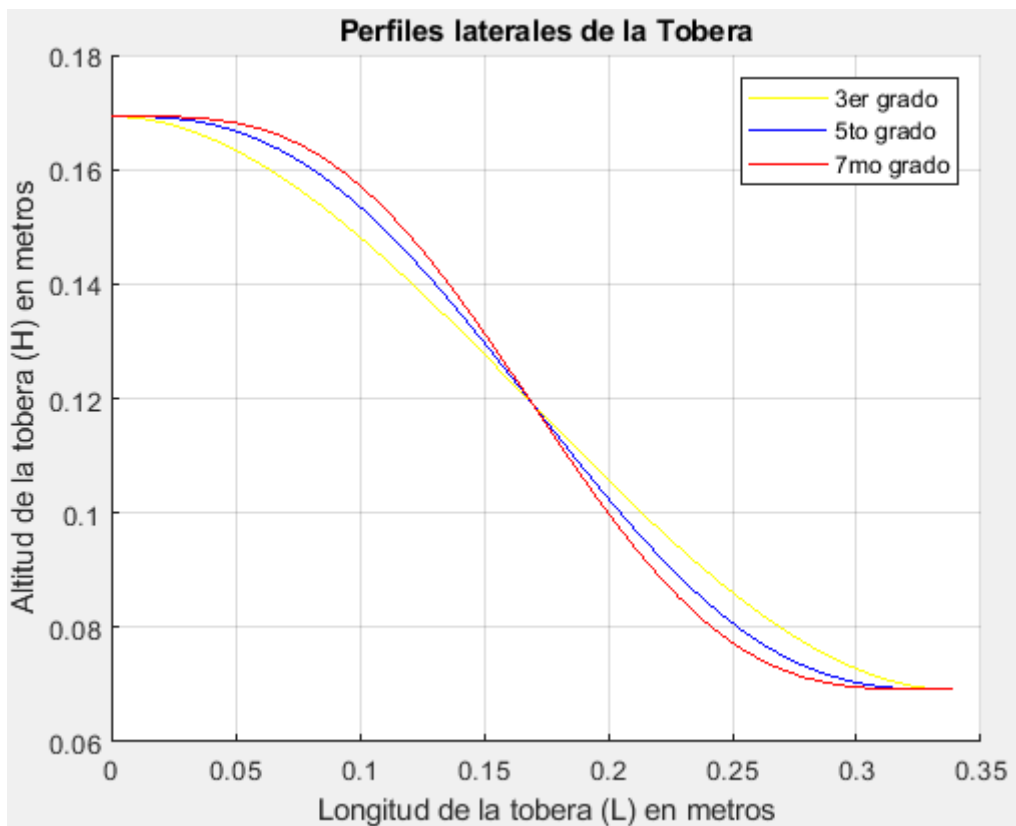


Figura 71

Descripción de la curva de perfiles de la contracción de acuerdo al grado de la función polinómica



Nota. Las funciones polinomiales para el trazo del perfil de la contracción, corresponden a las de mayor utilización dentro del área aerodinámica y vehicular.

Figura 72

Longitud del cono de divergencia vs el ángulo cónico de expansión

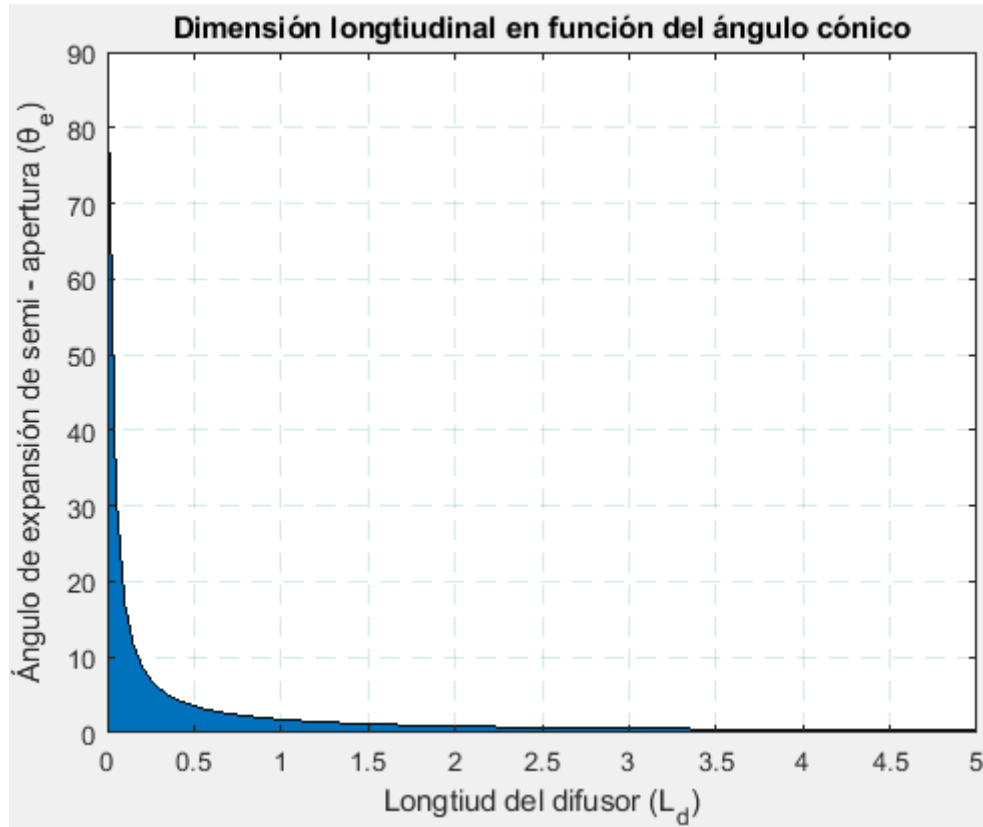


Figura 73

Tabla de resultados de la codificación de la longitud vs ángulo del difusor

0.00	90.00	1.30	1.36	2.55	0.69	3.80	0.47
0.05	31.72	1.35	1.31	2.60	0.68	3.85	0.46
0.10	17.17	1.40	1.26	2.65	0.67	3.90	0.45
0.15	11.64	1.45	1.22	2.70	0.66	3.95	0.45
0.20	8.78	1.50	1.18	2.75	0.64	4.00	0.44
0.25	7.05	1.55	1.14	2.80	0.63	4.05	0.44
0.30	5.88	1.60	1.11	2.85	0.62	4.10	0.43
0.35	5.05	1.65	1.07	2.90	0.61	4.15	0.43
0.40	4.42	1.70	1.04	2.95	0.60	4.20	0.42
0.45	3.93	1.75	1.01	3.00	0.59	4.25	0.42
0.50	3.54	1.80	0.98	3.05	0.58	4.30	0.41
0.55	3.22	1.85	0.96	3.10	0.57	4.35	0.41
0.60	2.95	1.90	0.93	3.15	0.56	4.40	0.40
0.65	2.72	1.95	0.91	3.20	0.55	4.45	0.40
0.70	2.53	2.00	0.89	3.25	0.54	4.50	0.39
0.75	2.36	2.05	0.86	3.30	0.54	4.55	0.39
0.80	2.21	2.10	0.84	3.35	0.53	4.60	0.38
0.85	2.08	2.15	0.82	3.40	0.52	4.65	0.38
0.90	1.97	2.20	0.80	3.45	0.51	4.70	0.38
0.95	1.86	2.25	0.79	3.50	0.51	4.75	0.37
1.00	1.77	2.30	0.77	3.55	0.50	4.80	0.37
1.05	1.69	2.35	0.75	3.60	0.49	4.85	0.37
1.10	1.61	2.40	0.74	3.65	0.49	4.90	0.36
1.15	1.54	2.45	0.72	3.70	0.48	4.95	0.36
1.20	1.48	2.50	0.71	3.75	0.47	5.00	0.35
1.25	1.42						

Nota: Se muestra los resultados de hasta una longitud de 5 metros del difusor.

A continuación, se muestra el lenguaje de programación general, ejecutado para la obtención de los resultados en función a las dimensiones de cada uno de los componentes del prototipo aerodinámico.

%VARIABLES DE ENTRADA - PROPUESTAS

%Características del objeto de estudio

f=0.7; %Constante

b=0.11494; %Ancho del modelo (m)

h=0.071259; %Altura del modelo (m)

l=0.241945; %longitud del modelo (m)

%Características del panel de abejas

hc=150; %Celdas del panel según criterio

Lh_dhh=6; %Relación de longitud del panel y diámetro hidráulico de la celda (m)

%Características de la Contracción

Rc=6; %Relación de contracción

%Características de la Cámara de Ensayos

Rb=0.3; %Relación de bloqueo

w_h=1; %Relación ancho : alto

l_dh=3; %Relación longitud : diámetro hidráulico

```

%Características del Difusor
angle=3.5; %Ángulo de expansión cónico de semi-apertura (°)
D=0.2; %Diámetro del ventilador (m)

.....
%Área frontal del objeto vehicular (m^2)
Af=f*b*h;
.....

% DIMENSIONAMIENTO DE LAS SECCIONES

%1. Cámara de Pruebas

%1.1 Área transversal de la cámara de pruebas (m^2)
Ats=Af/Rb;

%1.2 Ancho de la cámara (m)
wts=sqrt(Ats*w_h);

%1.3 Altura de la cámara (m)
hts=sqrt(Ats/w_h);

%1.4 Perímetro mojado para ducto de área cuadrada (m^2)
PM=4*wts;

%1.5 Diámetro hidráulico de la cámara (m)
Dhts=(4*Ats)/(PM);

%1.6 Longitud de la cámara (m)
Lts=Dhts*l_dh;
.....

%2. Cámara de Contracción

%2.1 Área transversal a la salida de la contracción (m^2)
Aec=Ats;

%2.2 Ancho de la área transversal a la salida de la contracción (m)
wec=wts;

%2.3 Altura de la área transversal a la salida de la contracción (m)
hec=hts;

%2.4 Área transversal a la entrada de la contracción (m^2)
Aic=Aec*Rc;

%2.5 Ancho del área transversal a la entrada de la contracción (m)
wic=sqrt(Aic*w_h);

%2.6 Altura del área transversal a la entrada de la contracción (m)
hic=sqrt(Aic*w_h);

%2.7 Longitud de la contracción (m)
Lc=sqrt(Aic);
.....

%3. Difusor

%3.1 Área transversal a la entrada del difusor (m^2)

```



```

Aid=Ats;

%3.2 Ancho del área a la entrada del difusor (m)
wid=wts;

%3.3 Altura del área a la entrada del difusor (m)
hid=hts;

%3.4 Diámetro hidráulico para el ducto cuadrado en la entrada del difusor (m)
Dhid=(4*wid^2)/(4*wid);

%3.5 Radio hidráulico a la entrada del difusor (m)
Rhid=Dhid/2;

%3.6 Área a la salida del difusor (m^2)
Aed=((pi*D^2)/4);

%3.7 Ancho del área a la salida del difusor (m)
wed=D;

%3.8 Altura del área a la salida del difusor (m)
hed=D;

%3.9 Diámetro hidráulico para el ducto circular a la salida del difusor (m)
Dhed=(4*(pi*(D^2/4)))/(pi*D);

%3.10 Radio hidráulico a la salida del difusor (m)
Rhed=Dhed/2;

%3.11 Longitud del difusor (m)
Ld=((Rhed-Rhid)/(tand(angle)));
.....

%4. Cámara de Estabilización
%4.1 Área a la salida de la cámara de sedimentación (m^2)
Aesc=Aic;

%4.2. Ancho a la salida de la cámara (m)
wesc=wic;

%4.3 Altura a la salida de la cámara (m)
hesc=hic;

%4.4 Área a la entrada de la cámara de sedimentación (m^2)
Aisc=Aesc;

%4.5 Ancho la entrada de la cámara (m)
wisc=wesc;

%4.6 Altura a la entrada de la cámara (m)
hisc=hesc;

%4.7 Perímetro humedecido de la cámara de sedimentación (m)
PMsc=2*(wisc+hisc);

%4.8 Diámetro hidráulico de la cámara de sedimentación (m)
Dhsc=(4*Aisc)/(PMsc);
.....

```

```

%5. Soporte del Ventilador
%5.1 Anchura a la entrada del soporte (m)
wifh=D;

%5.2 Altura a la entrada del soporte (m)
hifh=D;

%5.3 Anchura a la salida del soporte (m)
wefh=D;

%5.4 Altura a la salida del soporte (m)
hefh=D;

%5.5 Longitud (m)
Lfh=D;
.....

%6 Dispositivos acondicionadores de flujo: Honeycombs
%6.1 Área transversal total del panel (m^2)
Ah=Aisc;

%6.2 Número de celdas del panel (celdas reales basado en la teoría)
Nhc=hc*Dhsc;

%6.3 Área de una celda del panel (m^2)
Ahc=Ah/Nhc;

%6.4 Lado de una celda hexagonal regular del panel (m)
lhc=sqrt((2*Ahc)/(6*cosd(30))));

%6.5 Altura de una celda hexagonal regular del panel (m)
hhc=2*lhc*cosd(30);

%6.6 Apotema de una celda hexagonal regular del panel (m)
aphc=((sqrt(3))/2)*lhc;

%6.7 Perímetro de una celda hexagonal regular del panel (m)
Phc=lhc*6;

%6.8 Diagonal mayor o Diámetro máximo circunscrito de la celda hexagonal regular
del panel (m)
Dhc=2*lhc;

%6.9 Diagonal menor o Diámetro mínimo circunscrito de la celda hexagonal regular
del panel (m)
dhc=4*(((aphc*Phc)/2)/(Phc));

%6.10 Radio máximo o circunradio de la celda hexagonal regular del panel (m)
Rhc=lhc;

%6.11 Diámetro hidráulico de la celda del panel (m)
Dhhc=Dhc*sqrt(6/(pi*(sqrt(3))));

%6.12 Longitud del panel (m)
Lh=Dhhc*(Lh_dhh);

%4.9 Longitud de la cámara de sedimentación (m)
Lsc=Lh;
.....

```

```
Parametro =  
["Ancho(entrada)"; "Altura(entrada)"; "Ancho(salida)"; "Altura(salida)"; "Longitud  
Total"];  
Camara_Prueba = [wts;hts;wts;hts;Lts];  
Contraccion = [wic;hic;wec;hec;Lc];  
Difusor = [wid;hid;wed;hed;Ld];  
Camara_Estabilizacion = [wisc;hisc;wesc;hesc;Lsc];  
Soporte_Ventilador = [wifh;hifh;wefh;hefh;Lfh];  
patients =  
table(Parametro,Camara_Estabilizacion,Contraccion,Camara_Prueba,Difusor,Soporte_Ve  
ntilador)
```

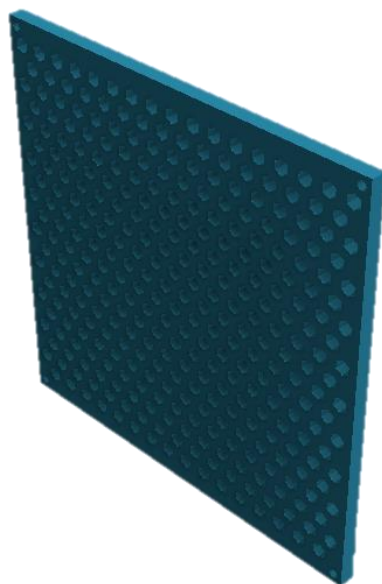
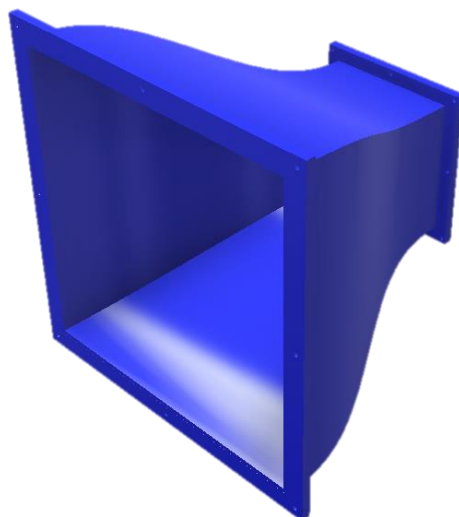
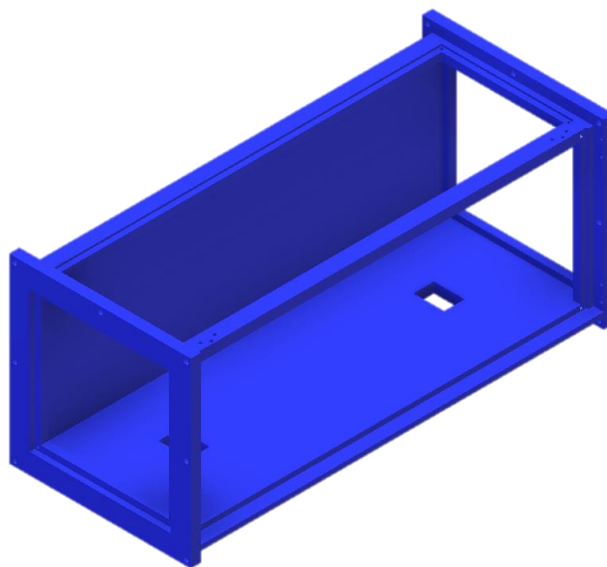
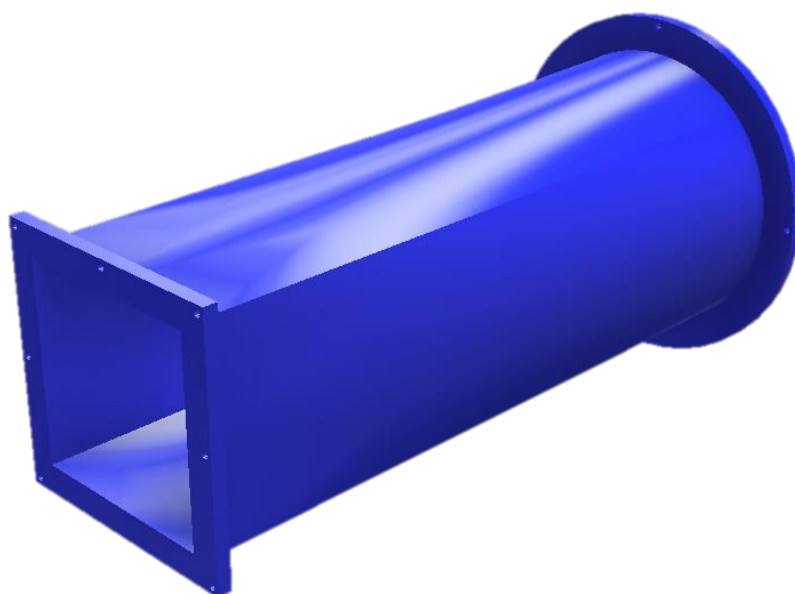
Anexo 4*Modelado del prototipo***Figura 74***Panal hexagonal***Figura 75***Contracción*

Figura 76*Cámara de ensayos***Figura 77***Difusor*

Anexo 5

Características del laminador y material de fabricación

Tabla 129

Características primarias del laminador

Propiedades	Detalles
Software	Cura Ultimaker
Versión	5.2.2
Sistemas Operativos	Windows, Mac OS X y Linux
Arquitectura	64 bits
Licencia	Gratuita
Enlace de descarga	https://ultimaker.com/es/software/ultimaker-cura

Nota. El programa en su última versión 2.0.3, dispone de un peso de 161 MB en presentación de archivo ejecutable. Tomado de: (Ultimaker, s.f.)

Tabla 130

Patrones de relleno

No.	Clase de patrón	No.	Clase de patrón
1	Rejilla	7	Octeto
2	Lineal	8	Cúbico tándem / bitruncado
3	Triangular	9	Concéntrico
4	Trihexagonal	10	Zigzag
5	Cúbica	11	Cruz
6	Subdivisión cúbica	12	Girode

Nota. Los patrones de llenado presentado en tabla están disponibles en la última versión 5.2.2 del programa Cura.

Tabla 131

Características generales de la impresora Tenlog TL-D5

Características	Especificaciones
Marca	Tenlog
Modelo	TL-D5
Volumen de impresión	500 × 500 × 600 mm
Precisión de manufactura	± 0,1 mm
Diámetro de filamento	1,75 mm
Filamento admisibles	TPU, PVA, PLA, ABS, Wood, PETG
Número de extrusor	2
Temperatura máxima de boquilla	250 ° C
Temperatura máxima de la cama	70 ° C
Velocidad mínima y máxima de impresión	10 – 150 mm/s
Rango de velocidad de impresión sugerido	30 – 60 mm/s
Exactitud de localización del eje x-y	0,011 mm
Exactitud de localización del eje z	0,0025 mm
Lectura de archivo	SD Card y puerto USB
Peso del artefacto	28 kg

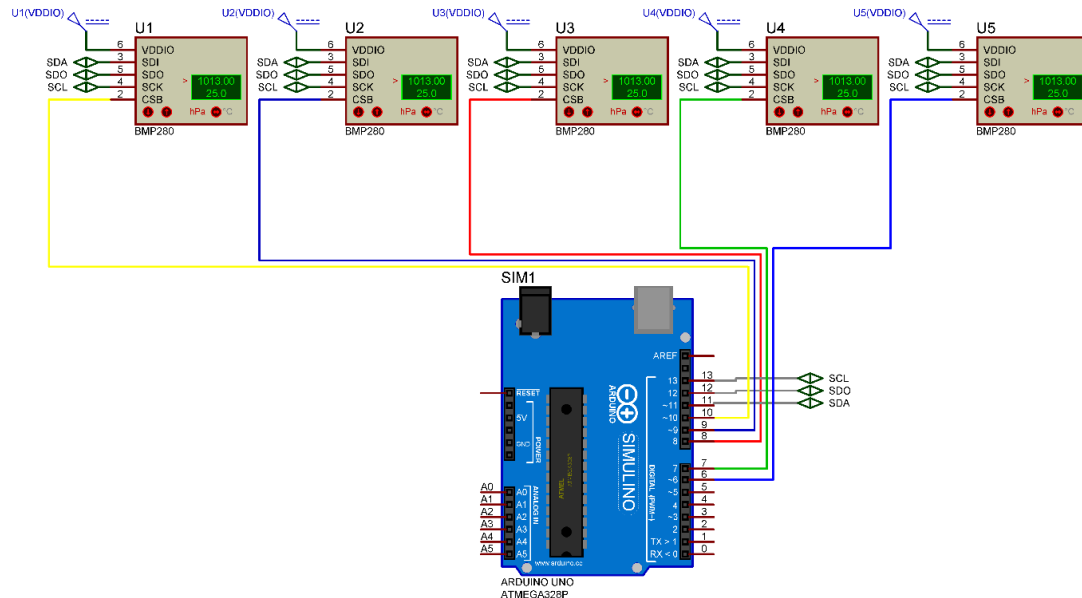
Nota. La impresora cuenta con dos sensores de filamento ubicado en la parte superior para cada cabezal y a su vez integra el mecanismo de doble engrane de extrusión que confiere mayor fuerza en la alimentación de la extrusora. Tomado de: (Technology, s.f.)

Anexo 6

Conexión y código de programación

Figura 78

Circuito del sensor BMP280 realizado en Proteus



El código de sensado para la temperatura y presión, presenta la siguiente estructura.

```

/*
  Autores: Yépez Andagana
*/
//1. Declaración de librerías
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <Adafruit_BMP280.h>

//2. Conexiones de pines con el Arduino
#define BMP_SCK (13) //SCL
#define BMP_MISO (12) //SDO
#define BMP_MOSI (11) //SDA
#define BMP_CS_5 (6)
#define BMP_CS_4 (7)
#define BMP_CS_3 (8)
#define BMP_CS_2 (9)
#define BMP_CS_1 (10)

//3. Números de sensores instalados
Adafruit_BMP280 sensor1(BMP_CS_1);
Adafruit_BMP280 sensor2(BMP_CS_2);
Adafruit_BMP280 sensor3(BMP_CS_3);
Adafruit_BMP280 sensor4(BMP_CS_4);
Adafruit_BMP280 sensor5(BMP_CS_5);

//Adafruit_BME280 bme(BME_CS, BME_MOSI, BME_MISO, BME_SCK);

//4. Búcle de configuración
void setup() {
  Serial.begin(9600);

```

```

Serial.println(F("Apertura de prueba"));
Serial.println("Ejecutando codigo");

if (!sensor1.begin()) {
  Serial.println(F("Verificar conexión sensor no.1 (10)"));
  while (1);
}

if (!sensor2.begin()) {
  Serial.println(F("Verificar conexión sensor no.2 (9)"));
  while (1);
}

if (!sensor3.begin()) {
  Serial.println(F("Verificar conexión sensor no.3 (8)"));
  while (1);
}

if (!sensor4.begin()) {
  Serial.println(F("Verificar conexión sensor no.4 (7)"));
  while (1);
}

if (!sensor5.begin()) {
  Serial.println(F("Verificar conexión sensor no.5 (6)"));
  while (1);
}
}

//5. Bucle cíclico
void loop() {
  // Visualizar información de los sensores
  Serial.println("Sensor 1");
  mostrarInfoSensor(sensor1);
  Serial.println("Sensor 2");
  mostrarInfoSensor(sensor2);
  Serial.println("Sensor 3");
  mostrarInfoSensor(sensor3);
  Serial.println("Sensor 4");
  mostrarInfoSensor(sensor4);
  Serial.println("Sensor 5");
  mostrarInfoSensor(sensor5);
  Serial.println("Autores: Yopez Andagana");

  // Tiempo de respuesta en la lectura
  Serial.println();
  delay(2000);
}

void mostrarInfoSensor(Adafruit_BMP280 sensor){

  // Variables de lectura
  Serial.print(F("Temperatura = "));
  Serial.print(sensor.readTemperature());
  Serial.println(" *C");

  Serial.print(F("Presion = "));
  Serial.print(sensor.readPressure());
  Serial.println(" Pa");

  Serial.println();
}

```


Figura 79

Aplicativo desarrollada en Microsoft Visual Studio

The image shows a screenshot of a Windows application window titled "General". The window contains a "Formulario General" with the following elements:

- Conexión Serial:** A section containing a "Puerto" label, a dropdown menu, a "Baudrate" label, another dropdown menu, and an "Estado" label. Below these is a "Conectar" button and a "Puerto" label.
- Toma Experimental:** A section containing seven labels: "Presión 1", "Presión 2", "Presión 3", "Presión 4", "Presión 5", "Temperatura C1", and "Temperatura C2".
- Atrás:** A button located at the bottom right of the window.

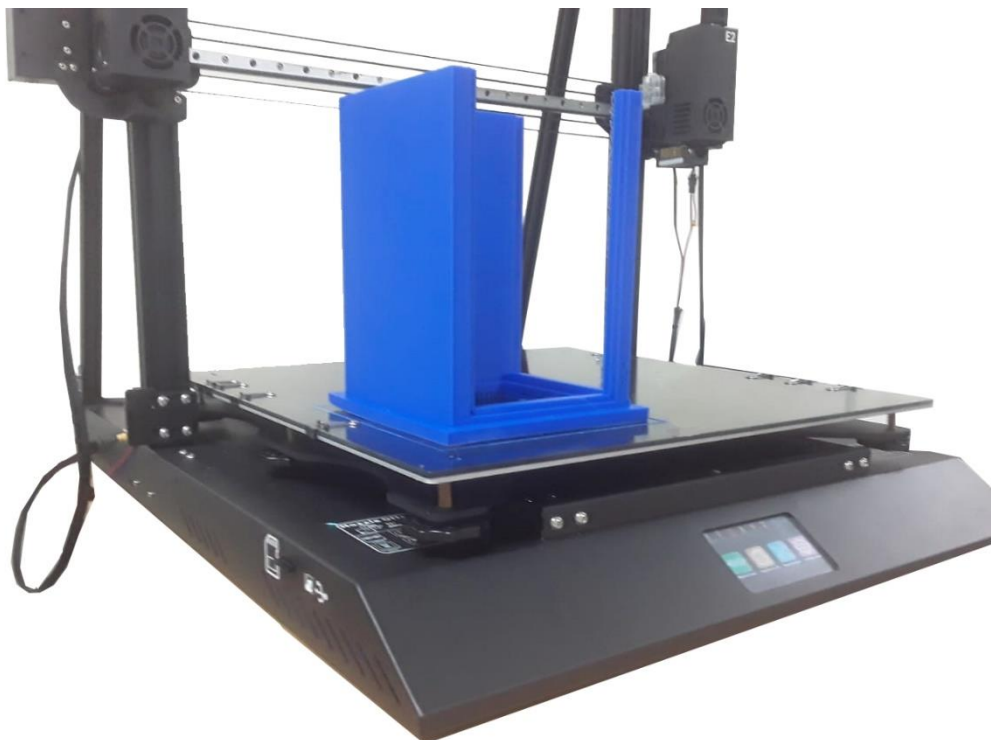
Anexo 7*Fabricación del banco aerodinámico***Figura 80***Manufacturación de la contracción***Figura 81***Manufacturación de la cámara de pruebas*

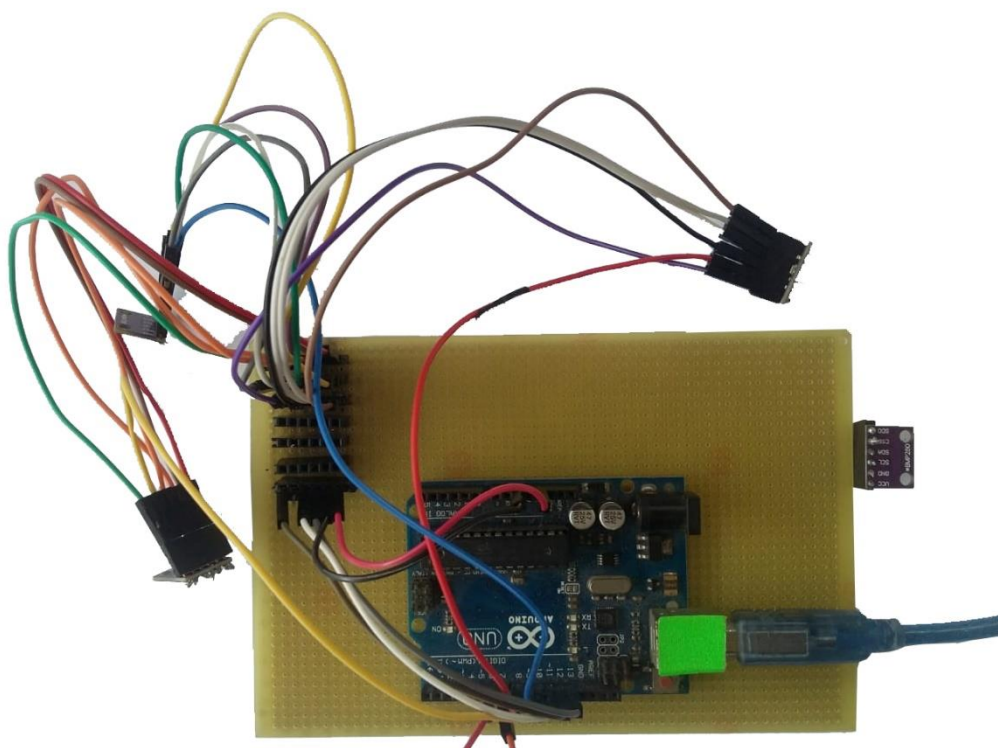
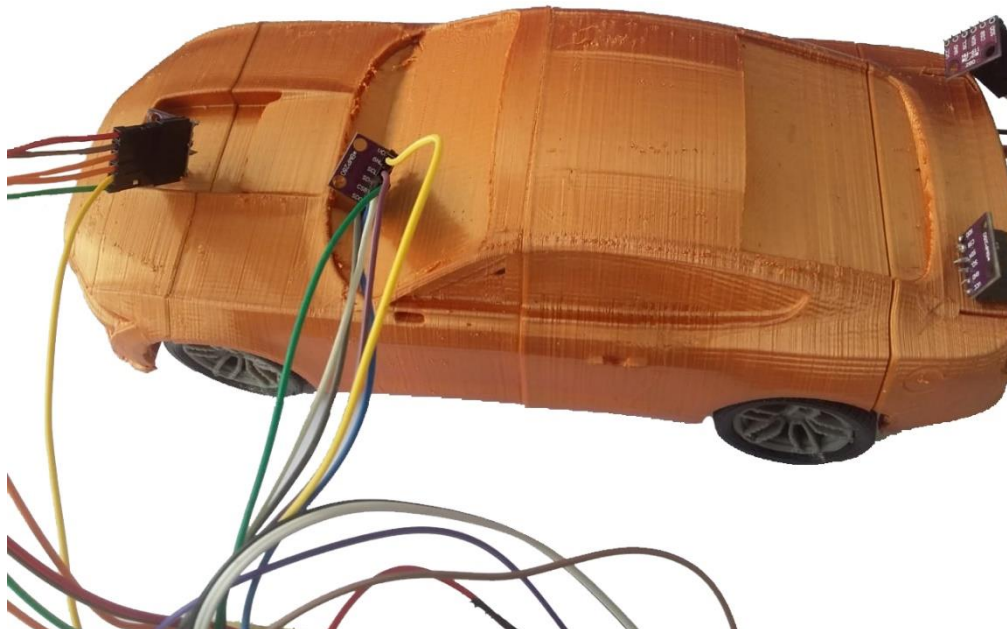
Figura 82*Prototipo aerodinámico***Figura 83***Placa para la captación de datos*

Figura 84

Conexión del prototipo en el túnel de viento



Anexo 8

Tablas termodinámicas

Figura 85

Propiedades estándar del aire

TABLA A-1

Masa molar, constante de gas y calores específicos de gas ideal de algunas sustancias

Sustancia	Masa molar M , kg/kmol	Constante de gas R , kJ/kg · K*	Datos de calores específicos a 25°C		
			c_p , kJ/kg · K	c_v , kJ/kg · K	$k = c_p/c_v$
Aire	28.97	0.2870	1.005	0.7180	1.400
Amoniaco, NH ₃	17.03	0.4882	2.093	1.605	1.304
Argón, Ar	39.95	0.2081	0.5203	0.3122	1.667
Bromo, Br ₂	159.81	0.05202	0.2253	0.1732	1.300
<i>n</i> -Butano, C ₄ H ₁₀	58.12	0.1430	1.694	1.551	1.092
Cloro, Cl ₂	70.905	0.1173	0.4781	0.3608	1.325
Clorodifluorometano (R-22), CHClF ₂	86.47	0.09615	0.6496	0.5535	1.174
Dióxido de azufre, SO ₂	64.06	0.1298	0.6228	0.4930	1.263
Dióxido de carbono, CO ₂	44.01	0.1889	0.8439	0.6550	1.288
Dióxido de nitrógeno, NO ₂	46.006	0.1889	0.8060	0.6171	1.306
Etano, C ₂ H ₆	30.070	0.2765	1.744	1.468	1.188
Etileno, C ₂ H ₄	28.054	0.2964	1.527	1.231	1.241
Flúor, F ₂	38.00	0.2187	0.8237	0.6050	1.362
Helio, He	4.003	2.077	5.193	3.116	1.667
<i>n</i> -Heptano, C ₇ H ₁₆	100.20	0.08297	1.649	1.566	1.053
<i>n</i> -Hexano, C ₆ H ₁₄	86.18	0.09647	1.654	1.558	1.062
Hidrógeno, H ₂	2.016	4.124	14.30	10.18	1.405
Isobutano, C ₄ H ₁₀	58.12	0.1430	1.663	1.520	1.094
Kriptón, Kr	83.80	0.09921	0.2480	0.1488	1.667
Metano, CH ₄	16.04	0.5182	2.226	1.708	1.303
Monóxido de carbono, CO	28.01	0.2968	1.039	0.7417	1.400
Neón, Ne	20.183	0.4119	1.030	0.6180	1.667
Nitrógeno, N ₂	28.01	0.2968	1.040	0.7429	1.400
Óxido nítrico, NO	30.006	0.2771	0.9992	0.7221	1.384
Oxígeno, O ₂	32.00	0.2598	0.9180	0.6582	1.395
<i>n</i> -Pentano, C ₅ H ₁₂	72.15	0.1152	1.664	1.549	1.074
Propano, C ₃ H ₈	44.097	0.1885	1.669	1.480	1.127
Propileno, C ₃ H ₆	42.08	0.1976	1.531	1.333	1.148
Tetraclorometano, CCl ₄	153.82	0.05405	0.5415	0.4875	1.111
Tetrafluoroetano (R-134a), C ₂ H ₂ F ₄	102.03	0.08149	0.8334	0.7519	1.108
Trifluoroetano (R-143a), C ₂ H ₃ F ₃	84.04	0.09893	0.9291	0.8302	1.119
Vapor de agua, H ₂ O	18.015	0.4615	1.865	1.403	1.329
Xenón, Xe	131.30	0.06332	0.1583	0.09499	1.667

Tomado de: (Çengel & Cimbala, 2006, p. 886)

Figura 86

Propiedades del aire a 101325 Pascales

TABLA A-9

Propiedades del aire a 1 atm de presión

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Densidad $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico c_p $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Tomado de: (Çengel & Cimbala, 2006, p. 894)

Anexo 9

Parámetros de simulación CAE

Tabla 132

Details of Mesh

Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
Elemen Order	Quadratic
Sizing	
Size Function	Uniform
Relevance Center	Fine
Quality	
Smoothing	High

Nota. Se establecen los parámetros de preprocesado de malla

Tabla 133

Other details of Mesh

Statistics	
Nodes	78226
Elements	18414

Nota. El número de nodos y elementos determinan la precisión de los resultados del análisis computacional del modelo.

Tabla 134

Domains Setting

Main Menu	Category	Subcategory	Parameter	Condition Value
Domain: Default Domain	Basic Settings	Location and Type	Location Domain Type	All geometry Fluid Domain
		Fluid and Particle Definitions	–	Fluid 1
		Fluid 1	Material Morphology Reference Pressure	Air at 25 °C Continuous Fluid 101242,9348 [Pa]
		Domain Models	Domain Motion / Option	Stationary
	Fluid Models	Heat Transfer	Option	Total Energy
		Turbulence	Option	Shear Stress Transport

Tabla 135

Inlet Boundary Setting

Main Menu	Category	Subcategory	Parameter	Condition Value
Boundary: Inlet	Basic Settings	–	Boundary Type	Inlet
		–	Location	Inlet
	Boundary Details	Flow Regime	Option	Subsonic
		Mass And Momentum	Option	Velocidad normal
		–	Normal Speed	4,1667 [m s ⁻¹]
		Turbulence	Option	Medium (Intensity = 5%)
		Heat Trnasfer	Option	Total Temperature
–	Total Temperature	30 [C]		

Tabla 136

Outlet Boundary Setting

Menú principal	Categoría del menú	Sección	Parámetro / Función	Valor de la condición
Boundary: Outlet	Basic Settings	–	Boundary Type Location	Outlet Outlet

Boundary Details	Flow Regime Mass And Momentum	Option Option Relative Pressure	Subsonic Static Pressure 101118,46 [Pa]
------------------	-------------------------------------	---------------------------------------	---

Tabla 137*Wall Boundary Setting*

Menú principal	Categoría del menú	Sección	Parámetro / Función	Valor de la condición
Boundary: Wall	Basic Settings	–	Boundary Type	Wall
		Mass And Momentum	Location	Wall
	Wall Roughness	Rugosidad de la pared	Option	No Slip Wall
			Option Sand Grain Roughness	Rough Wall 3×10^{-7} [m]

Tabla 138*Conditions of Velocity Inlet*

Zone name	Settings Tab	Parameter	Parameter value
Inlet	Momentum	Velocity Specification Method	Magnitude, Normal to Boundary
		Velocity Magnitude (m/s)	4,1667
	Thermal	Initial Gauge Pressure (pascal)	0
		Temperature (K)	303,15

Tabla 139*Conditions of Pressure Outlet*

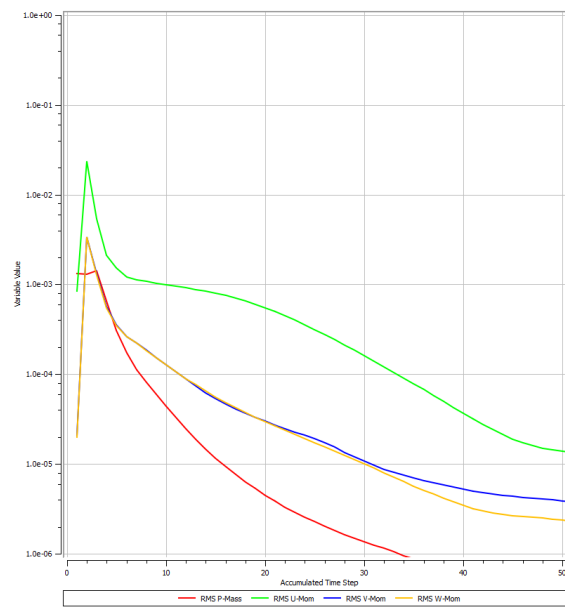
Zone name	Settings Tab	Parameter	Parameter value
Outlet	Momentum	Initial Gauge Pressure (pascal)	0
	Térmico	Temperature (K)	303,15

Tabla 140*Conditions of Wall Zone*

Zone name	Settings Tab	Parameter	Parameter value
Wall	Momentum	Wall Motion	Stacionary Wall
		Shear Condition	No Slip
	Thermal	Thermal Conditions	Temperatura
		Temperature (K)	303,15
		Wall Thickness (m)	$3e^{-07}$
		Density (kg/m ³)	1350
	Material (Properties)	C _p (Specific Heat) (J/kg·K)	1200
		Thermal Conductivity (W/m·K)	0,3

Figura 87

Mapa de iteraciones de la simulación paramétrica



Nota. La figura señala el número de iteraciones necesarias para procesar los resultados de la simulación.

Figura 88

Energía cinética turbulenta

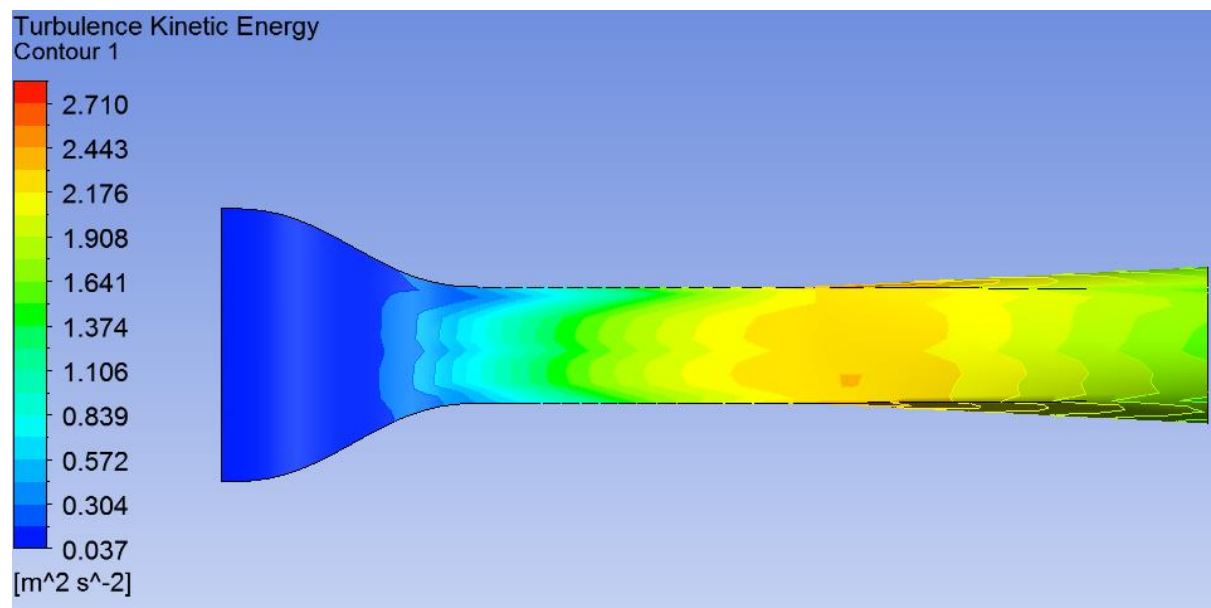
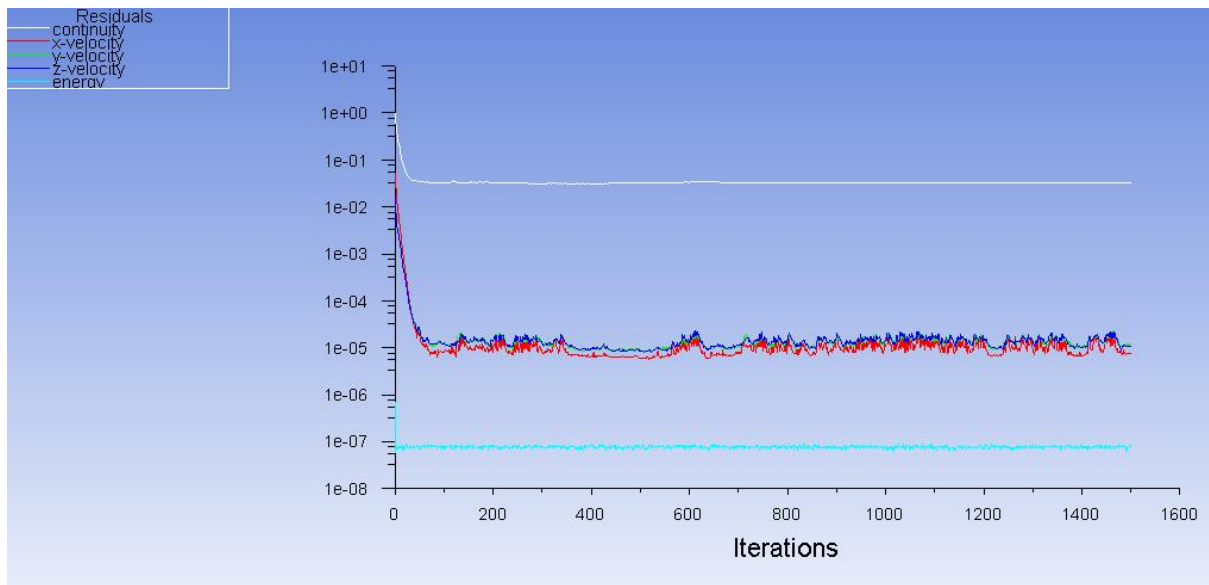


Figura 89

Resultado de la iteración en Ansys Fluent



Nota. Se ha empleado 1500 iteraciones

Anexo 10

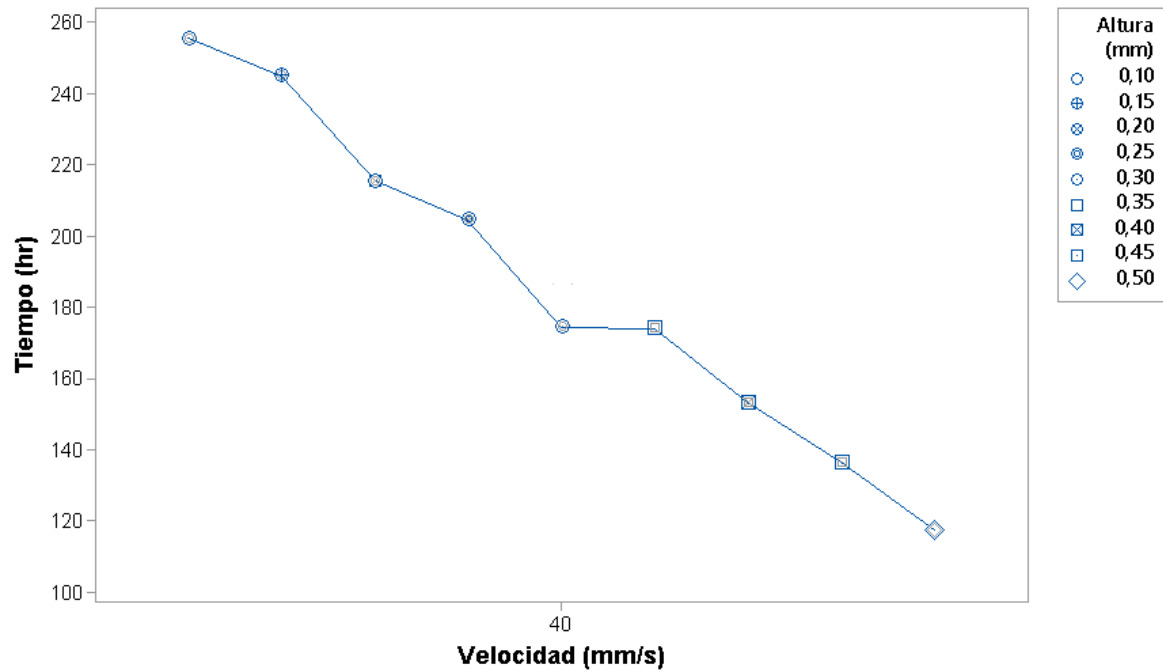
Características del dispositivo de instrumentación

Tabla 141

Características del anemómetro de hélice

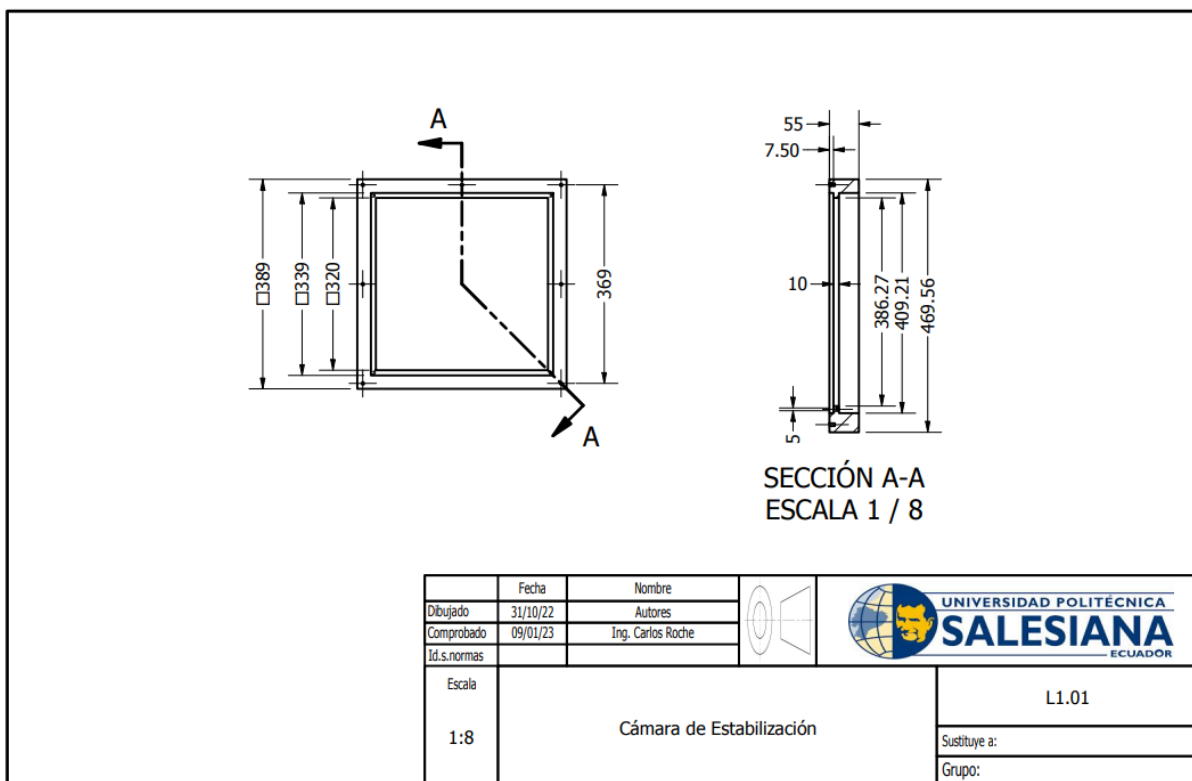
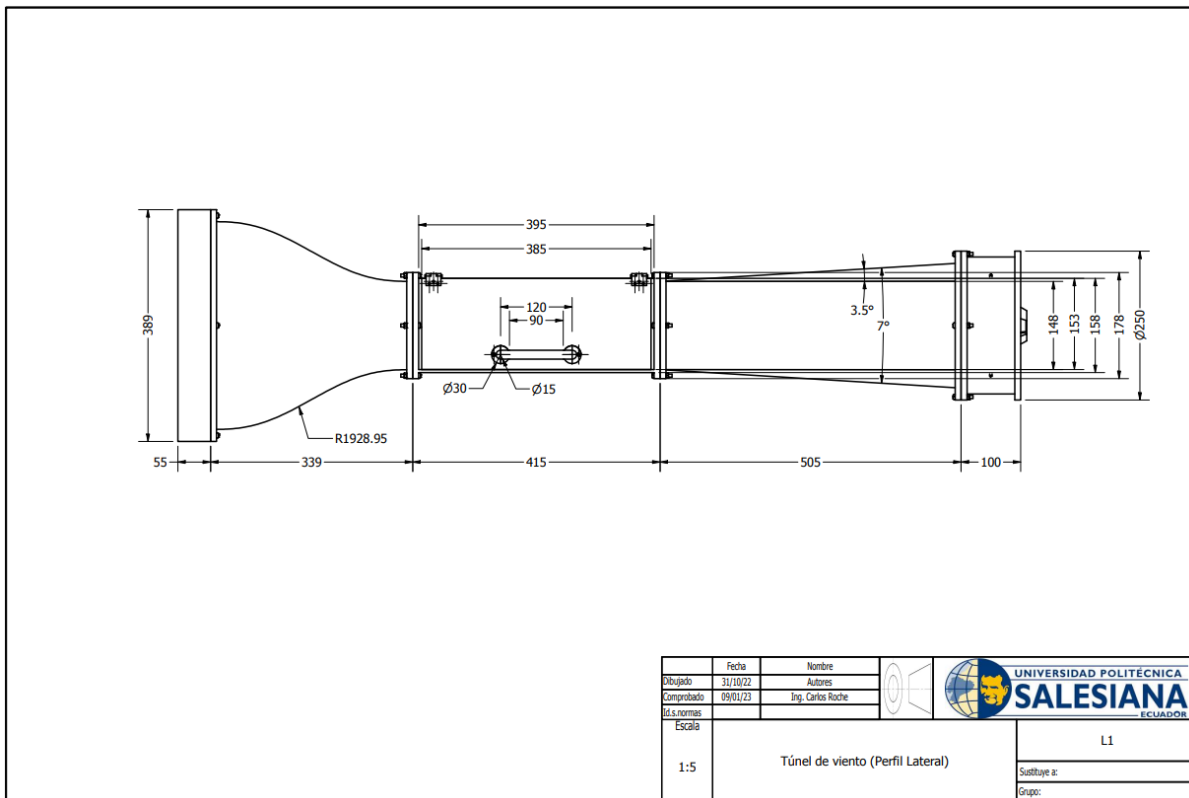
Características	Especificación
Marca	AOPUTTRIVER
Modelo	AP-866A
Rango de velocidad	0,3 a 40 m/s
Precisión	0,03 m/s ⁻¹
Unidades de temperatura	°C - °F
Rango de temperatura	- 10 °C a 60 °C (14 °F a 113 °F)
Unidades de velocidad permisibles	m/s, km/h, ft/min, nudos y mph

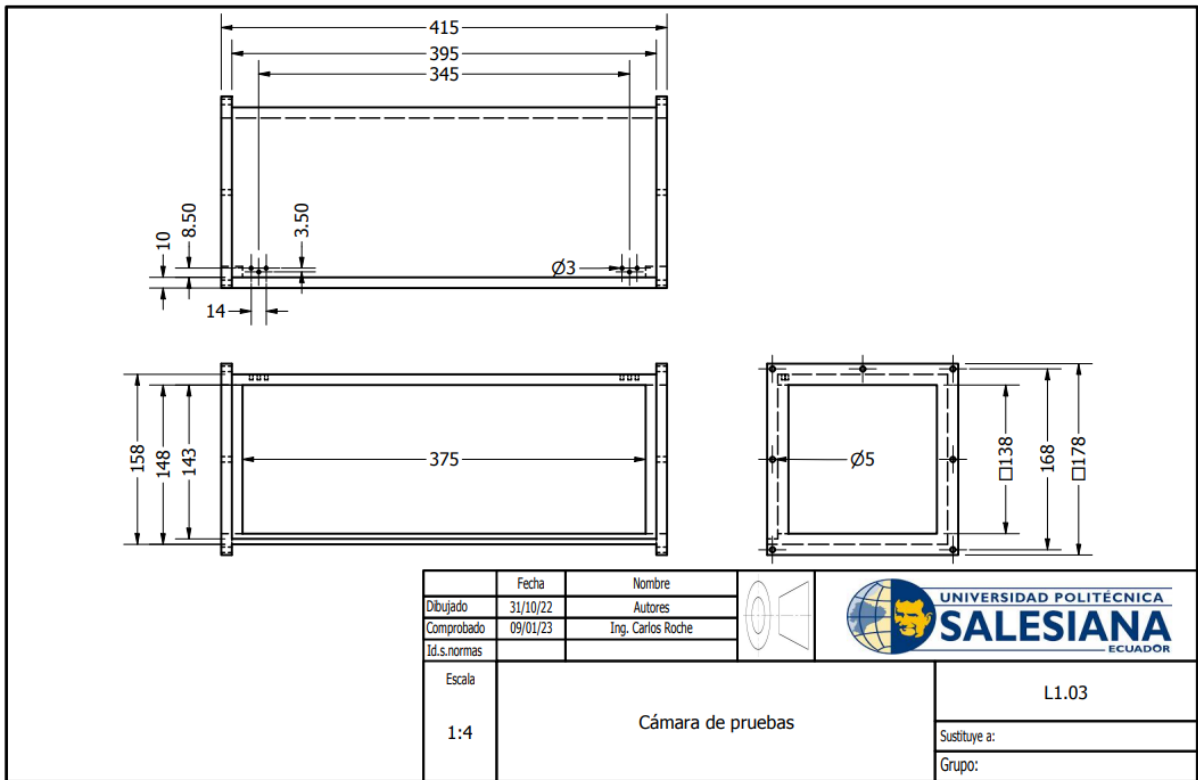
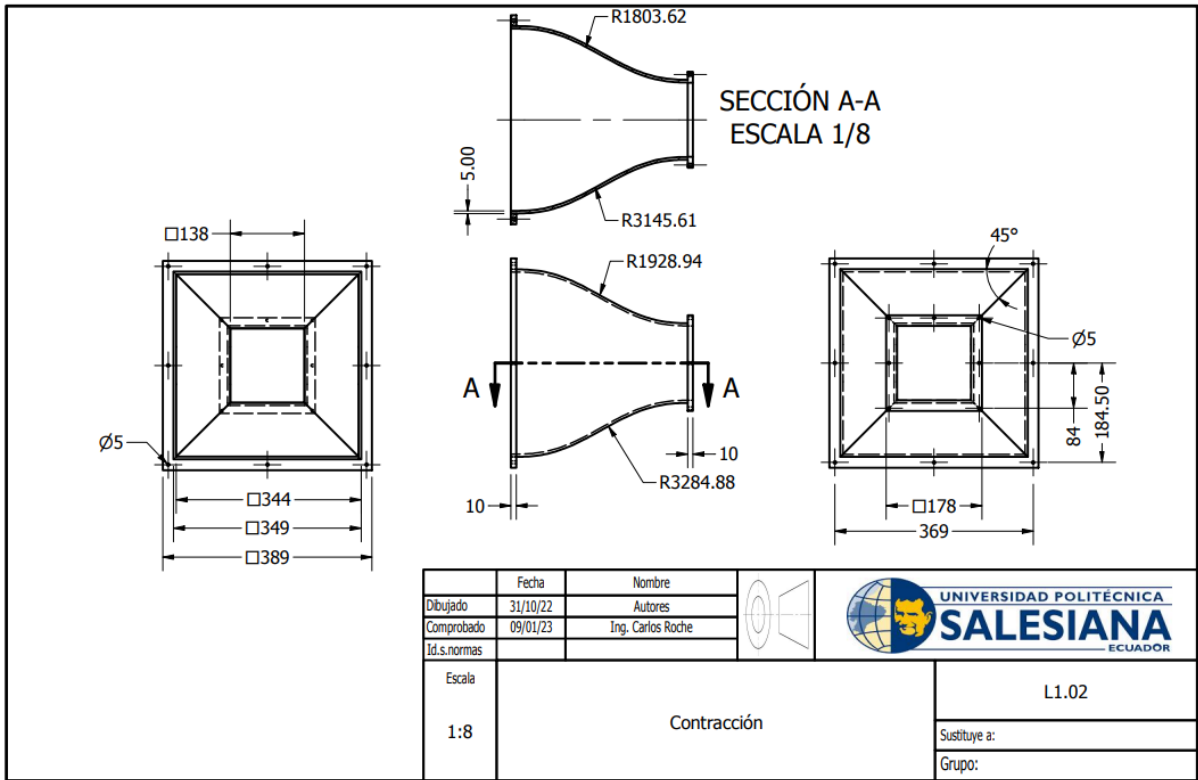
Nota. El dispositivo cuenta con ocho paletas para la recepción de datos que convierte la energía mecánica a eléctrica por medio de su transductor. Tomado de: (FAKESPOT, s.f.)

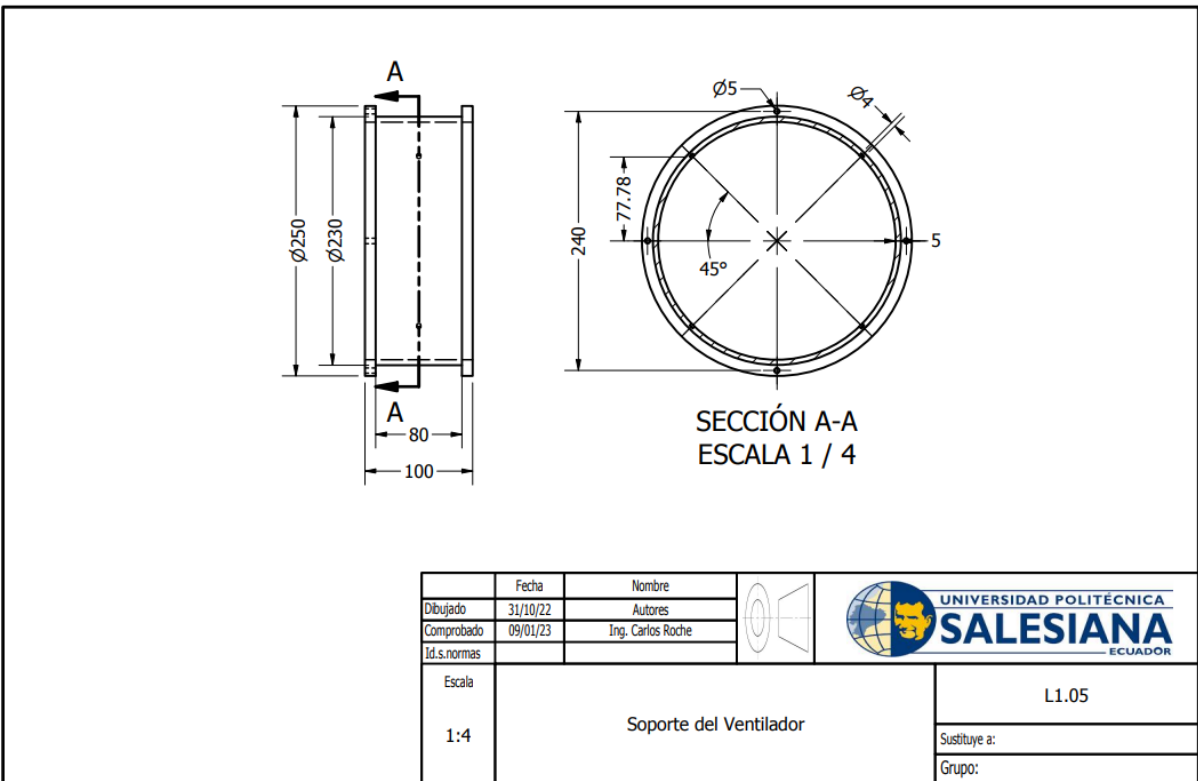
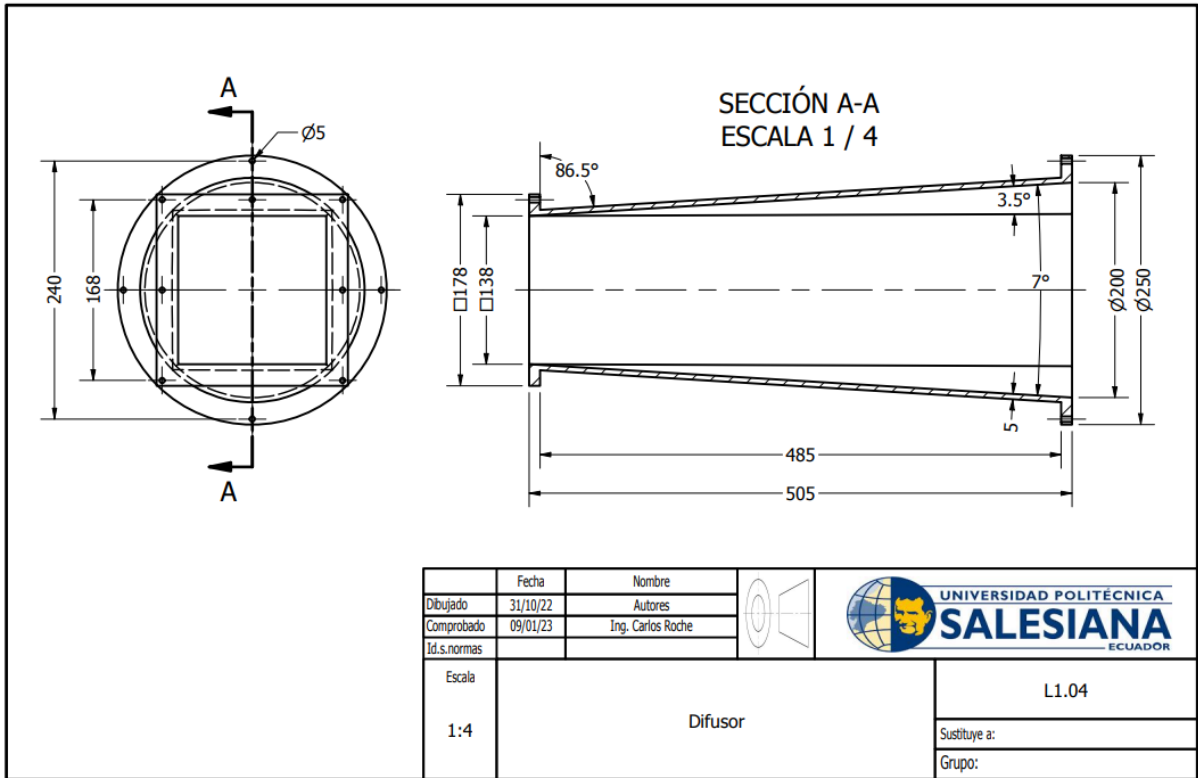
Anexo 11*Diseño de experimentos***Figura 90***Selección de parámetro de impresión según ilustración estadística***Gráfica de variables múltiple para Tiempo (hr) por Altura (mm) - Relleno (%)***Variable de panel: Relleno (%)*

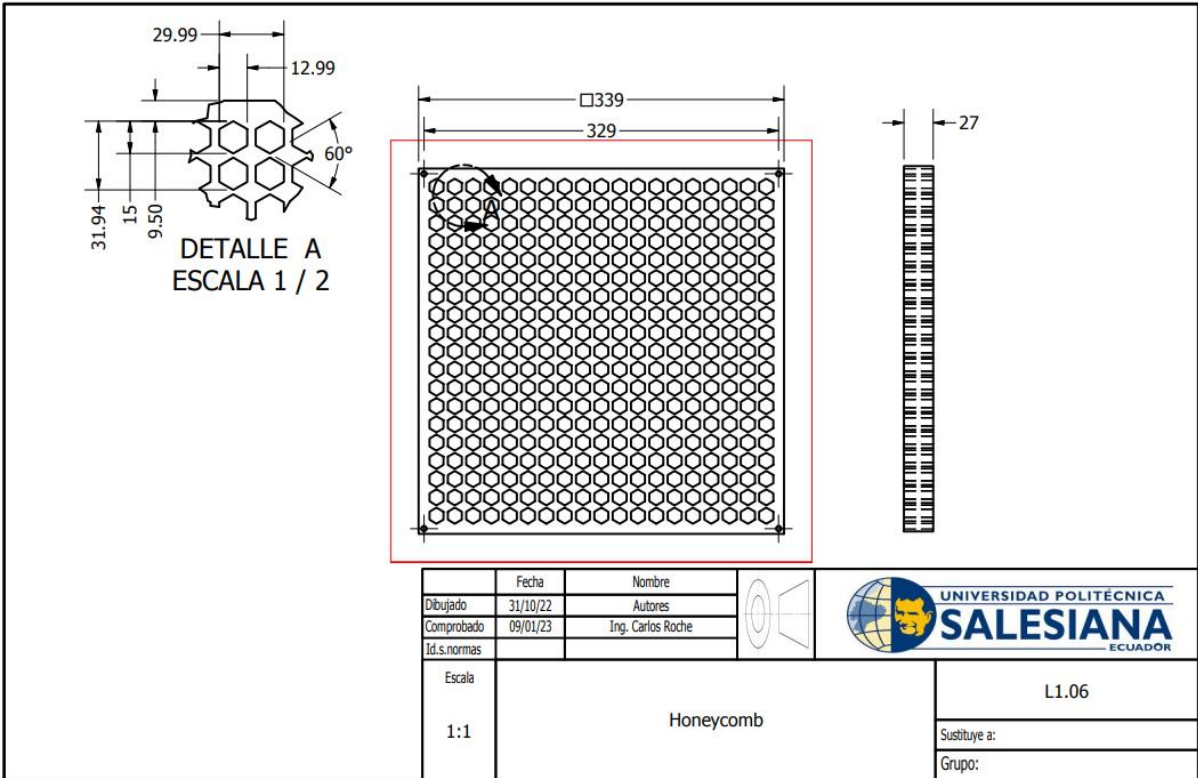
Anexo 12

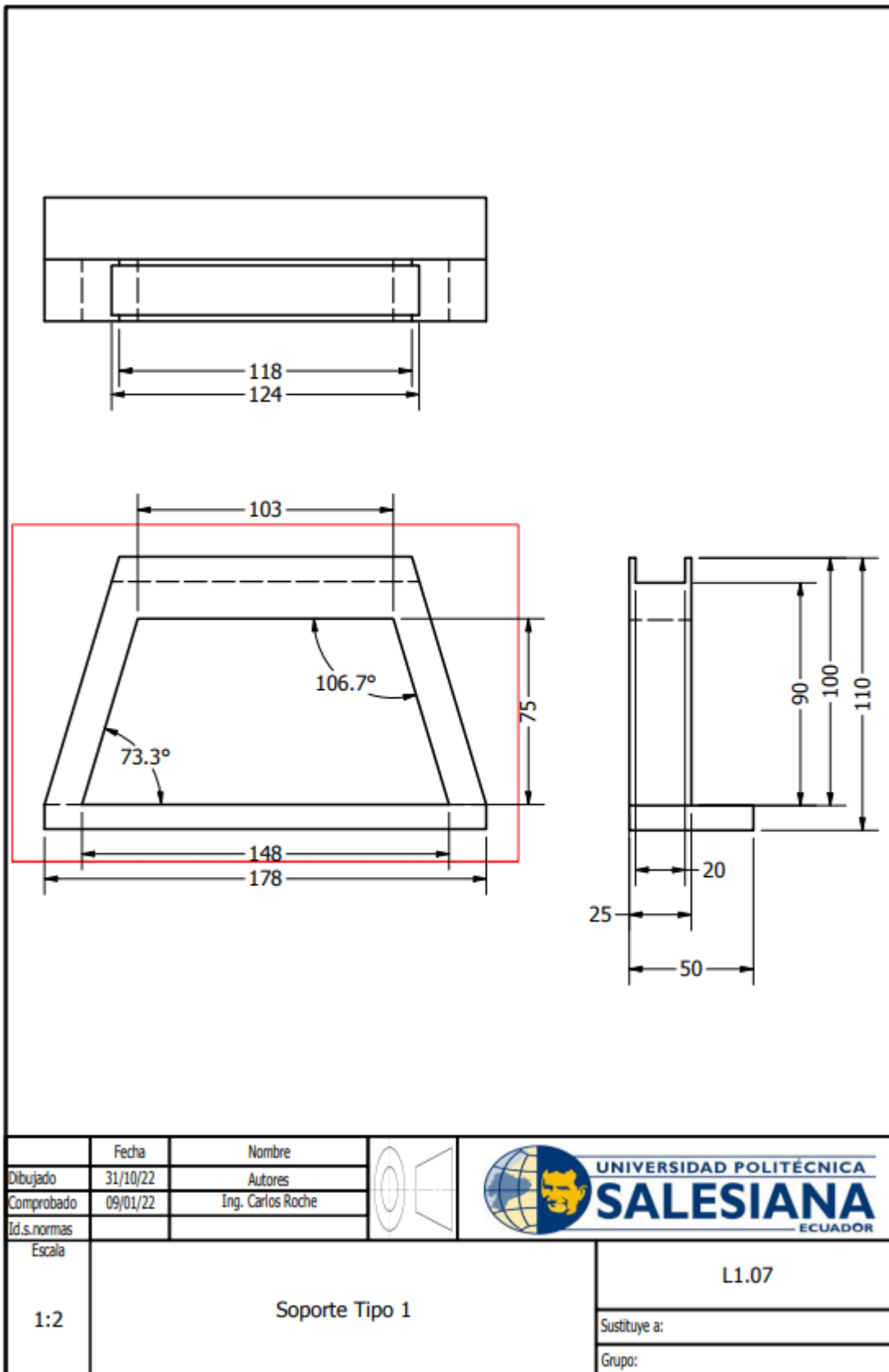
Acotaciones

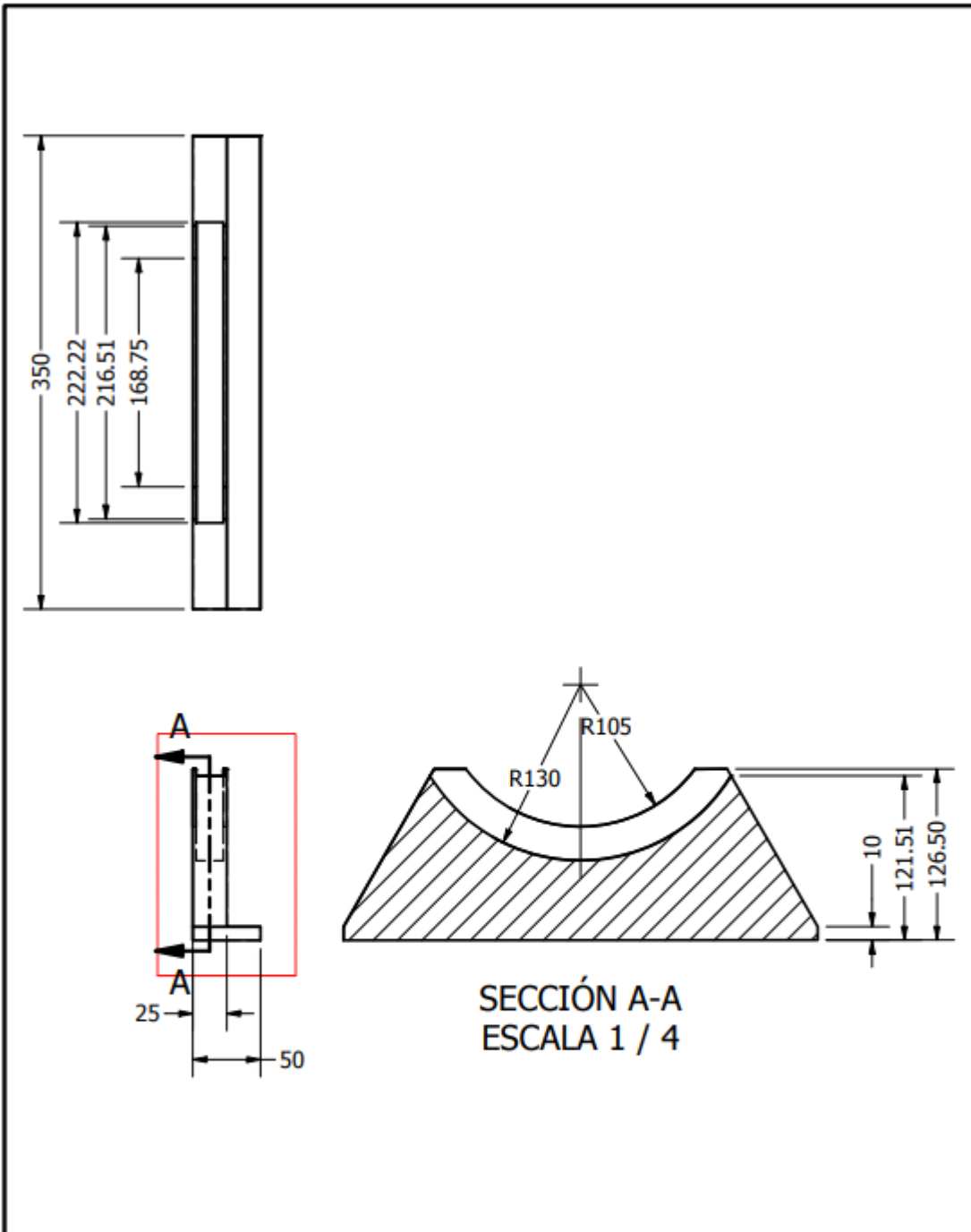






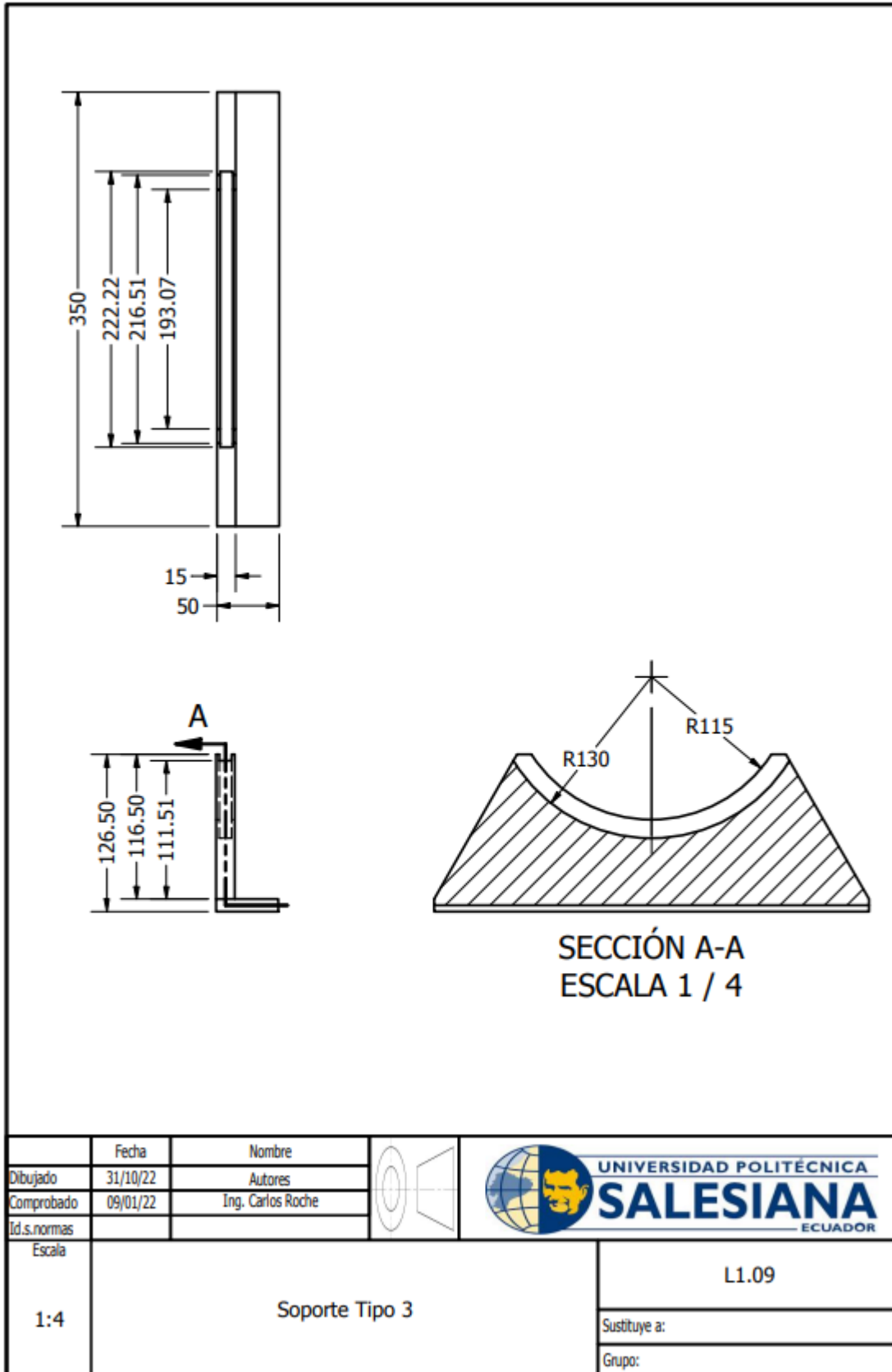




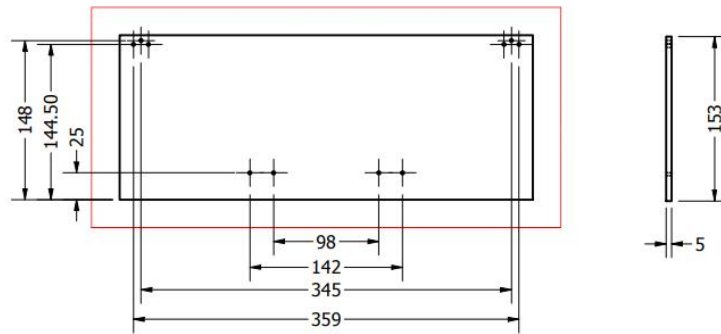


SECCIÓN A-A
ESCALA 1 / 4

	Fecha	Nombre		 UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
Dibujado	31/10/22	Autores		
Comprobado	09/01/22	Ing. Carlos Roche		
Id.s.normas				
Escala	Soporte Tipo 2			L1.08
1:4				Sustituye a:
				Grupo:



	Fecha	Nombre	 
Dibujado	31/10/22	Autores	
Comprobado	09/01/22	Ing. Carlos Roche	
Id.s.normas			
Escala	Soporte Tipo 3		L1.09
1:4			Sustituye a:
			Grupo:



	Fecha	Nombre		
Dibujado	31/10/22	Autores	 	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA <small>ECUADOR</small>
Comprobado	09/01/23	Ing. Carlos Roche		
Id.s.normas				
Escala	Lámina Acrílica			L1.10
1:4				Sustituye a:
				Grupo: